



DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Técnica e
Cultura

Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani

EDITORES

Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: Técnica e Cultura

ISBN: 978-65-87391-12-0

DOI: 10.11606/9786587391120

**Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani
(Editores)**

2021



Universidade de São Paulo

Reitor - Prof. Dr. Vahan Agopyan

Vice-reitor - Prof. Dr. Antonio Carlos Hernandez



ESALQ

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Diretor - Prof. Dr. Durval Dourado Neto

Vice-diretor - Prof. Dr. João Roberto Spotti Lopes

Dados de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura [recurso eletrônico] / edição de Alysson Paolinelli, Durval Dourado Neto e Everardo Chartuni Mantovani. -- Piracicaba : ESALQ - USP, 2021.
598 p. : il. -- (Cátedra Luiz de Queiroz)

ISBN: 978-65-87391-12-0
DOI: 10.11606/9786587391120

1. Irrigação - Brasil 2. Produção agrícola 3. Água 4. Sustentabilidade 5. Recursos hídricos I. Paolinelli, A., ed. II. Dourado Neto, D., ed. III. Mantovani, E. C., ed. IV. Título

CDD 631.7

Elaborada por Maria Angela de Toledo Leme - CRB-8/3359

Está autorizada a reprodução parcial ou total desta obra desde que citada a fonte, mas proibido o uso com fins comerciais.



Cátedra Luiz de Queiroz

Conselho de Governança

Durval Dourado Neto

João Roberto Spotti Lopes

Luiz Gustavo Nussio

Nelson Sidnei Massola Junior

Ruy de Araújo Caldas

Conselho Editorial

Fabiana Lumi Kikuchi Hamada
Marcela Almeida de Araujo
Naila de Freitas Takahashi
Veronica Marques Alves

Apoio Editorial

Leandro de Souza Almeida
Luciana Joia de Lima
Sandra de Marchi Vello

Capa

Hugo Arantes, Studio 1 Comunicação

Fotos da Capa

1. Everardo Mantovani;
 2. Everardo Mantovani;
 3. Everardo Mantovani;
 4. Everardo Mantovani;
 5. Shutterstock.
- (da esquerda para direita)

Fotos da Contracapa

Gerhard Waller, Divisão de Comunicação da Esalq/USP
Quadros de autoria do professor Klaus Reichardt (Nikolaus).

Fotos dos Editores

Abramilho; Gerhard Waller/DvComun/Esalq/USP; Everardo Mantovani.

CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTA OBRA E O PROFESSOR ALYSSON PAOLINELLI, TERCEIRO TITULAR DA CÁTEDRA LUIZ DE QUEIROZ

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq), da Universidade de São Paulo (USP), anunciou em 10 de outubro de 2017 a instalação da Cátedra Luiz de Queiroz, que foi aprovada por sua Congregação em 14 de setembro de 2017, iniciativa apoiada pelo Instituto de Estudos Avançados (IEA) da Universidade de São Paulo (USP). A indicação do Conselho de Governança da Cátedra do eminente **Ex-Ministro Alysson Paolinelli** para ser o **Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz (Ciclo 2020/2022)**, foi aprovada em reunião da Congregação em 28 de maio de 2020, com posse em 3 de junho de 2020 para um ciclo anual, sendo reconduzido para novo ciclo, até 2 de junho de 2022 (Portaria Interna Reitoria 215, de 26/04/21).

O Conselho de Governança da Cátedra Luiz de Queiroz é composto pelos seguintes membros: Durval Dourado Neto (Docente do Departamento de Produção Vegetal e Diretor da Esalq/USP), João Roberto Spotti Lopes (Docente do Departamento de Entomologia e Acarologia e Vice-Diretor da Esalq/USP), Luiz Gustavo Nussio (Docente do Departamento de Zootecnia da Esalq/USP), Nelson Sidnei Massola Junior (Docente do Departamento de Fitopatologia e Nematologia da Esalq/USP) e Ruy de Araújo Caldas (Membro externo de notório saber).

A **Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados** é uma cadeira voltada para a discussão e realização de atividades abertas à participação de professores e estudantes de graduação e de pós-graduação da Instituição. Tem por finalidade promover reflexões e atividades interdisciplinares, em nível regional, nacional e internacional, sobre temas relativos ao desenvolvimento e sustentabilidade de Sistemas Agropecuários Integrados e suas aplicações com o ambiente e com a sociedade.

Alysson Paolinelli é Engenheiro Agrônomo formado em 1959 pela Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG). Especializou-se nos estudos sobre o potencial da região do Cerrado para a produção agrícola. Em 1971, assumiu a Secretaria de Agricultura de Minas Gerais. Foi ministro da Agricultura no Governo de Ernesto Geisel, de 15 de março de 1974 a 15 de março de 1979. Nesse período, Paolinelli modernizou a Embrapa e promoveu a ocupação econômica do Cerrado.

Em 2006, indicado por Norman Borlaug, foi agraciado com o prêmio *World Food Prize* (equivalente ao Prêmio Nobel da alimentação), por liderar a implantação da Agricultura Tropical no Cerrado Brasileiro. Em agosto de 2017, recebeu a Medalha Luiz de Queiroz, e, em 2021, foi indicado para o Prêmio Nobel da Paz, pelo seu legado em transformar o Brasil em potência mundial do agronegócio e no papel do País em alimentar pessoas no mundo todo.

Foi Diretor-Geral da ESAL (atual, UFLA). É presidente executivo da Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho), diretor da Verde AgriTech desde 2014 e presidente do Conselho Consultivo do Fórum do Futuro.

A principal temática desenvolvida na Cátedra Luiz de Queiroz (Ciclo 2020/2022) está voltada para projetos e propostas de políticas e ações públicas e privadas que organizem a atividade rural nacional de forma sustentável na Agricultura Irrigada, por meio de Sistemas Agropecuários Integrados no Brasil e tendo em vista sua inserção no agronegócio.

Quanto às Políticas Públicas na Agricultura Irrigada, o principal projeto a ser desenvolvido: Biomass Tropicais: [i] Caracterização da disponibilidade hídrica no Brasil, e [ii] desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil.

Quanto à Liderança Internacional (A5 - *Agricultural Academic Alliance*), a Cátedra visa colaborar com a consolidação da Aliança entre a Universidade de São Paulo (USP), por intermédio da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), *Wageningen University and Research (WUR)*, *University of California-Davis (UCDavis)*, *China Agricultural University (CAU)*, e *Cornell University* (melhores universidades de Ciências Agrárias do Mundo no ranking da editora *U.S. News and World Report 2016*), que tem por objetivo viabilizar a realização de programas acadêmicos internacionais de longa duração para atender as demandas do mundo nas áreas de Agricultura, Pecuária, Meio Ambiente e Segurança Alimentar.

Ao final do primeiro ciclo como Terceiro Catedrático, aos 120 anos do Aniversário da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, **Alysson Paolinelli** apresenta esta obra que agrega as principais lideranças da área de Agricultura Irrigada no Brasil.

Prof. Dr. Vahan Agopyan

Reitor da Universidade de São Paulo

ALYSSON PAOLINELLI: VIDA E OBRA E O SEU O LEGADO PARA PAZ

O Ex-Ministro Alysson Paolinelli teve atuação de grande destaque em toda sua trajetória acadêmica e profissional.

Primeiro colocado no vestibular do Curso de Agronomia da Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), foi o presidente do Centro Acadêmico daquela instituição, onde se graduou Engenheiro Agrônomo em 1959, como primeiro colocado e orador da Turma de Formandos. Foi Diretor da ESAL (hoje Universidade Federal de Lavras - UFLA) entre 1967 e 1971, onde lecionou Hidráulica, Irrigação e Drenagem por 11 anos.

Nesse período, aprendeu os fundamentos básicos da Academia: a essência do conhecimento científico é a sua aplicação prática, como preconizava Confúcio, com o intuito maior de transformar conhecimento em riqueza para melhoria da vida de todos, especialmente os menos favorecidos. Desde o início foi um líder independente que sempre cultivou a PAZ e norteou suas ações com base na CIÊNCIA.

Especializou-se nos estudos sobre o potencial da região do Cerrado para a produção agrícola e teve brilhante atuação na direção de órgãos públicos, criando e implantando programas e instituições de grande importância na agricultura.

Foi Secretário de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais de 1971 a 1974, quando criou o Programa Integrado de Pesquisas Agropecuárias de Minas Gerais (hoje Epamig).

De 1991 a 1998, novamente Secretário, criou e implantou o Instituto Mineiro Agropecuário (IMA), que coordena programas de defesa sanitária animal e vegetal, e de qualidade e certificação de produtos agropecuários.

Foi Ministro da Agricultura de 1974 a 1979. Nesse período, Paolinelli impulsionou a expansão da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), criou e implantou a Embrater (Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural), e promoveu a ocupação econômica do Cerrado através do PRODECER, programa conjunto entre o Brasil e o Japão.

Posteriormente, atuou como presidente de várias instituições públicas e privadas, destacando-se o Banco do Estado de Minas Gerais (1979-1982), a Associação Brasileira de Bancos Comerciais Estaduais (Asbace) (1980-1982), a Fiat Allis Latino Americana (1982-1996 e 1998-2001), a Confederação Nacional de Agricultura do Brasil (CNA) (1988-1990), o Fórum Nacional de Agricultura (1992-1993) e a Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho) (2010-2015). Sempre apoiou o associativismo e o cooperativismo como formas de organização dos produtores rurais.

Atualmente, é presidente do Instituto Fórum do Futuro, que promove o desenvolvimento de uma agricultura tropical sustentável.

Ao longo de sua brilhante carreira recebeu diversos prêmios, condecorações e títulos honoríficos. Em âmbito nacional, destacam-se o Prêmio Frederico de Menezes Veiga (Embrapa, 1981), Professor Emérito (Universidade Federal de Lavras, 2006), Personalidade do Agronegócio (Associação Brasileira de Agronegócio, 2006), Ordem Nacional do Mérito Científico (Classe Grã-Cruz, 2008), Medalha dos 150 anos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa, 2010) e Medalha Luiz de Queiroz (Esalq/USP, 2017). Também obteve amplo reconhecimento internacional.

O notável Alysson Paolinelli é praticante da agricultura mais moderna, a de baixo carbono, tendo obtido o reconhecimento por lideranças de todas as tendências ideológicas. São várias as homenagens a ele feitas por membros dos mais diversos partidos no âmbito do Parlamento brasileiro, bem como - e principalmente - de inúmeras instituições acadêmicas. Isso acontece não só por Paolinelli ter sido um técnico que valorizou a agricultura brasileira, mas por ter colocado em prática políticas que instrumentalizaram sustentavelmente o combate à fome no Brasil e no mundo.

Sua atuação política no debate Constituinte redundou na Constituição Federal de 1988, primando, sempre, por liberdade e igualdade a todos os brasileiros.

Alysson Paolinelli, por meio de emendas ao anteprojeto da Constituição no âmbito da Subcomissão da Política Agrícola e Fundiária e da Reforma Agrária da Assembleia Nacional Constituinte, propôs que a ordem econômica e social tivesse que propiciar o desenvolvimento nacional e a justiça social com base nos princípios da liberdade de iniciativa; da propriedade privada dos meios de produção; da valorização do trabalho; da função social da propriedade e da igualdade de oportunidades.

Segundo Paolinelli, a função social da propriedade é cumprida quando propicia o bem-estar de todos que dela dependem; mantém níveis satisfatórios de utilização e eficiência; e assegura a conservação dos recursos naturais e justas relações de trabalho.

Suas ideias e propostas, que podem ser revisitadas nos arquivos da Assembleia Nacional Constituinte, contribuíram sobremaneira para o perfil final da Carta Magna cidadã de 1988, equacionando o embate que existe entre igualdade e liberdade. O Estado tem de intervir para produzir condições de igualdade; para regular as oportunidades; para torná-las acessíveis a todos os seres humanos, independentemente de sua cor, origem, gênero ou condição social. Sem descuidar, por outro lado, da liberdade, da ideia de Estado que prima pelas liberdades individuais.

Quando Ministro da Agricultura entre 15 de março de 1974 a 15 de março de 1979, consolidou a Embrapa como empresa de pesquisa e promoveu o desenvolvimento rural brasileiro com base na ciência, tecnologia e inovação, bem antes de que a Constituição de 1988 estabelecesse que ao Estado cabe promover e incentivar o desenvolvimento científico, a pesquisa, e a capacitação, tendo em vista o bem público e o progresso da nação.

Sob a inspiração de Paolinelli, as instituições de Pesquisa, como universidades, empresas estaduais e a Embrapa, desenvolveram sistemas de produção específicos ao ambiente de produção tropical, viabilizando a exploração racional do Cerrado, otimizando a utilização dos recursos naturais, insumos agrícolas, mão-de-obra, terra e capital, o que resultou na expansão da produção sustentável de alimentos para parcela significativa da população mundial.

Não seria possível o desenvolvimento da agricultura e pecuária na savana brasileira sem as iniciativas do Ministro Alysson Paolinelli.

Não foi por acaso, portanto, o reconhecimento dado a ele, diante da grandeza de seus projetos e ações: foi agraciado, em 2006, com o prêmio *World Food Prize*, o equivalente ao Nobel da alimentação, por liderar a implantação da Agricultura Tropical Sustentável no Cerrado Brasileiro. Esse prêmio é dado a pessoas, independente de raça e gênero, que ajudaram consideravelmente a população a melhorar a qualidade, quantidade ou disponibilidade de alimentos no mundo.

Em 2019 foi nomeado Embaixador da Boa Vontade do Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA).

Em 2020, Alysson Paolinelli se tornou o Terceiro Titular da **Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados** (Ciclo 2020/2022), uma cadeira voltada para a

discussão e realização de atividades abertas à participação de professores e estudantes de graduação e de pós-graduação da USP, coordenada por uma personalidade de notório saber. Tem por finalidade promover reflexões e atividades interdisciplinares, em nível regional, nacional e internacional, sobre temas relativos ao desenvolvimento e sustentabilidade de Sistemas Agropecuários Integrados e suas aplicações com o meio ambiente e com a sociedade

Em 22 de janeiro de 2021, ALYSSON PAOLINELLI foi indicado pela Universidade de São Paulo, por intermédio da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", para o Prêmio Nobel da Paz, pelo seu legado para promoção da PAZ através da oferta de alimentos em nível global: não haverá PAZ enquanto houver FOME.

Transformou o Brasil, da condição de importador de alimentos em 1970, em potência mundial do agronegócio que viabilizou o Brasil alimentar mais de 10% da população mundial e de liderar como Terceiro Catedrático da Esalq/USP o Projeto Biomas, que procura estruturar um planejamento estratégico para prover a produção de alimentos para mais 1 bilhão e cento e vinte milhões de pessoas em 2050, sempre tendo como alicerce de seus programas a ciência, a tecnologia, a sustentabilidade e a inovação.

Alysson Paolinelli é, enfim, um líder brasileiro provedor da PAZ em nível MUNDIAL, tanto no PASSADO com o desenvolvimento da Agricultura Sustentável no Cerrado preservando a Amazônia, como no PRESENTE e no FUTURO liderando o Projeto Biomas na Academia como Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz.

**Roberto Rodrigues
Durval Dourado Neto**

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE ESTE LIVRO

A **OBRA** intitulada **DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL** foi organizada em dois livros e em seis importantes partes: **História, Política Pública, Economia, Recurso Hídrico, Técnica e Cultura**. Envolve 56 capítulos e mais de 1241 páginas (incluindo a parte pré-textual) e, dentro da visão de integração que sempre foi a forma de atuar do Ex-Ministro Alysson Paolinelli, contemplando 117 autores de diferentes instituições públicas e privadas, possibilitando uma literatura que será uma referência para o setor.

Este **LIVRO** intitulado **DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL** foi organizado em 2 PARTES (**Técnica e Cultura**), contendo 26 CAPÍTULOS em 598 páginas (contemplando 56 AUTORES de diferentes instituições públicas e privadas) assim discriminados:

Título - DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL: Técnica e Cultura

Parte I - TÉCNICA

CAPÍTULO 1. A revolução azul no contexto da agricultura irrigada por *Rubens Duarte Coelho*

CAPÍTULO 2. Pivô central: história, mercado, tecnologia e futuro por *Renato Silva*

CAPÍTULO 3. Irrigação por gotejamento: histórico e evolução tecnológica por *Marcus Henrique Tessler*

CAPÍTULO 4. O manejo da irrigação e o futuro da agricultura irrigada por *Daniel Fonseca de Carvalho e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira*

CAPÍTULO 5. A evolução da irrigação mecanizada moldando os rumos da tecnologia de aplicação por *Gustavo Fanelli Hossri*

CAPÍTULO 6. Projeto e execução de sistemas de drenagem agrícola por *Jarbas Honorio de Miranda, Laura Elizabeth Christianson e Luciano Alves de Oliveira*

CAPÍTULO 7. Irrigação e fertirrigação em ambiente protegido por *Sergio Nascimento Duarte*

CAPÍTULO 8. Subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional por *João Carlos Cury Saad*

CAPÍTULO 9. Irrigação com *deficit* por *Luís Henrique Basso*

CAPÍTULO 10. Irrigação de baixo custo por sulcos por *Edmar José Scaloppi*

CAPÍTULO 11. Variabilidade e mudanças climáticas no contexto da agricultura irrigada por *Paulo Cesar Sentelhas*

CAPÍTULO 12. Manejo da irrigação no brasil: aplicações, desafios e tendências para o futuro por *Mirta Teresinha Petry, Reimar Carlesso e Juliano Dalcin Martins*

CAPÍTULO 13. Tecnologias digitais para monitoramento da irrigação por *Catariny Cabral Aleman, Fernando França da Cunha, Rubens Alves de Oliveira e Roberto Filgueiras*

CAPÍTULO 14. Os transientes hidráulicos e a agricultura irrigada por *Rodrigo Ribeiro Franco Vieira*

CAPÍTULO 15. Produtividade da água na agricultura irrigada por *José Antônio Frizzone e Verônica Gaspar Martins Leite de Melo*

CAPÍTULO 16. Eficiência de uso da água na agricultura irrigada por *Salassier Bernardo, Elias Fernandes de Sousa e Everardo Chartuni Mantovani*

CAPÍTULO 17. Índice de desenvolvimento rural sustentável por *Durval Dourado Neto, Allan Delfino, Pedro Alves Quilici Coutinho, Rodnei Rizzo, Marcela Almeida de Araujo, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto, Pedro Abel Vieira Júnior, Roberto Rodrigues e Alysson Paolinelli*

CAPÍTULO 18. Fertirrigação: aspectos relevantes e viabilidade técnica x financeira por *Luiz Fabiano Palaretti e Alexandre Barcellos Dalri*

Parte II - CULTURA

Capítulo 19. Irrigação de pastagens por *Luís César Dias Drumond, Fernando Campos Mendonça, André Santana Andrade, Maicon Fábio Appelt e Danielle Moraes Amorim*

CAPÍTULO 20. Irrigação do cafeeiro por *André Luís Teixeira Fernandes e Eusímio Felisbino Fraga Júnior*

CAPÍTULO 21. Irrigação de fruteiras tropicais (abacaxizeiro, bananeira, mamoeiro e mangueira) por *Eugênio Ferreira Coelho, Dionei Lima Santos e Welson Lima Simões*

CAPÍTULO 22. Irrigação de fruteiras subtropicais (citricultura e videira) por *Regina Célia de Matos Pires, Marco Antônio Fonseca Conceição e Maurício Antônio Coelho Filho*

CAPÍTULO 23. Manejo da irrigação em plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares por *Patrícia Angélica Alves Marques e Catariny Cabral Aleman*

CAPÍTULO 24. Irrigação para gramados e paisagismo no Brasil por *Jose Giacoia Neto*

CAPÍTULO 25. Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: história, mitos e desafios por *Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira*

CAPÍTULO 26. Sistema irrigado de produção de cana de açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva por *Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira*

Este livro é parte de uma importante estratégia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Esalq/USP) que integra anualmente ao seu corpo técnico científico uma personalidade com especiais serviços prestados ao Brasil como Titular

da Cátedra Luiz de Queiroz. No Ciclo 2020/2022, o Ex-Ministro Alysson Paolinelli é o Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz de Sistemas Agropecuários Integrados.

A importância do trabalho do Ex-Ministro Alysson para agricultura irrigada brasileira é inquestionável, inicialmente como professor da área na antiga Escola Superior de Agricultura de Lavras (Esal), hoje Universidade Federal de Lavras (Ufla), e posteriormente como Secretário de Agricultura do Estado de Minas Gerais, Ministro da Agricultura, inúmeros outros cargos na iniciativa pública e privada e uma incansável participação em eventos técnicos. Neste sentido foi proposta a elaboração deste livro como uma das atividades do Ex-Ministro Alysson.

A agricultura irrigada é uma das principais estratégias brasileiras para garantir o aumento da produção de alimentos com **sustentabilidade**: (i) **social** com a geração de inúmeros empregos diretos e indiretos, (ii) **ambiental** com a área adicional irrigável de cerca de 15 Mha, no período de 30 anos, não necessitar o desmatamento de novas áreas ("desmatamento zero"), e (iii) **econômica** devido ao aumento da produção e, conseqüentemente, da renda no campo, na agroindústria e na área de serviços. O mundo demanda, segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), que o Brasil produza alimento para cerca de 2,7 bilhões de pessoas (de um total 9,8 bilhões de pessoas – população mundial) em 2050, sabendo que atualmente produz para cerca de 1,5 bilhões (de um total 7 bilhões de pessoas – população mundial).

As publicações técnicas são muito importantes para o desenvolvimento da agricultura irrigada porque subsidiam e norteiam ações da iniciativa pública e privada, pelo fato dos profissionais desses setores apresentarem soluções eminentemente técnicas, com base científica, e que representam os atuais valores da sociedade, visando transformar conhecimento em riqueza em benefício de todos os segmentos da sociedade. Para representar a visão da SOCIEDADE BRASILEIRA, foram convidados os profissionais que apresentaram contribuições nos diferentes capítulos desta OBRA. Para representar a visão do ESTADO BRASILEIRO, foram convidadas as seguintes autoridades: (i) o Exmo. Sr. Vice-Presidente da República, **Antonio Hamilton Martins Mourão**, para realizar a APRESENTAÇÃO desta OBRA, (ii) a Exma. Sra. Ministra da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, **Tereza Cristina Corrêa da Costa Dias**, para realizar o PREFÁCIO, e (iii) o Exmo. Sr. Ministro do Desenvolvimento Regional, **Rogério Simonetti Marinho**, para realizar o POSFÁCIO.

Esta obra foi lançada nas comemorações do aniversário (3 de junho de 2021) de 120 de anos da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (Esalq/USP), motivo pelo qual a contracapa deste livro foi contemplada com as fotos (fotógrafo Gerhard Waller, DvComun/Esalq/USP) dos quadros de autoria do talentoso pintor Nikolaus (pseudônimo do Professor Klaus Reichardt): o '**retrato de dentro para fora**' do Portal Monumental da Esalq/USP retrata como a Esalq/USP se relaciona com sociedade e o '**retrato de fora para dentro**' do Portal Monumental da Esalq/USP retrata a visão da sociedade concernente à Esalq/USP. O Portal Monumental da Esalq/USP foi revitalizado após mais de 60 anos de inatividade e reinaugurado no dia 3 de junho de 2021 juntamente com a publicação desta obra.

Assim, os editores agradecem de forma muito especial às contribuições dos autores, que não mediram esforços para escrever um pouco da experiência de cada um, para esta importante obra da área de agricultura irrigada.

Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani
OS EDITORES

OS AUTORES

1. Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto. Engenheiro Agrônomo e Doutor em Ciências (USP), Pós-doutor (CNPq). Atua nas áreas de planejamento do uso da terra e modelagem espacial com ênfase em produção agropecuária, desenvolvimento rural e meio ambiente. No Grupo de Políticas Públicas da Esalq/USP (GPP) coordena a concepção de soluções em políticas públicas através de análise de dados e geotecnologias.

2. Allan Delfino. Advogado, Pós Graduado em Direito Tributário pelo IBET (Instituto Brasileiro de Estudos Tributários), com especialização em Agronegócio MBA-Gestão em Agronegócio pela Esalq/USP, Extensão em Direito do Agronegócio pelo INSPER e Mestre em Agronegócio pela FGV, atua como advogado militante na defesa do produtor rural desde 2004, foi Presidente da Comissão de Direito do Agronegócio de Sorocaba pela OAB 2017-2018, é produtor rural e trabalhou como consultor para várias empresas do setor de fertilizantes.

3. Alexandre Barcellos Dalri. Engenheiro Agrícola pela Ufla, com mestrado e doutorado em Irrigação e Drenagem pela Unesp/FCA. Atualmente é Professor da Unesp/FCAV, Jaboticabal. Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Irrigação e Drenagem, atuando principalmente nos seguintes temas: agricultura irrigada, hidrologia e agricultura digital. Professor e Orientador no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (Unesp/Botucatu) e Ciência do Solo (Unesp/Jaboticabal).

4. Alysson Paolinelli. Engenheiro Agrônomo (ESAL, 1959). Foi Ministro da Agricultura (1974-1979). Prêmio *World Food Prize* (2006). Indicado ao Prêmio Nobel da Paz (2021). Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz (Esalq/USP, 2020-2022).

5. André Luís Teixeira Fernandes. Engenheiro Agrônomo e Mestre em Irrigação e Drenagem (Esalq/USP), Doutor em Engenharia Agrícola (Feagri/Unicam). É Pró-Reitor de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão da Universidade de Uberaba (UNIUBE), é membro titular do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Presidente Executivo do Instituto de Estudos Avançados em Veterinária José Caetano e Presidente da Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA).

6. André Santana Andrade. Engenheiro Agrônomo pela UFV (2011), Mestre pela Esalq/USP (2014), Professor Assistente 1 do Unipam e Consultor técnico da empresa Capital Agrícola. Possui vários artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais e trabalhos apresentados em eventos técnicos e científicos. Atualmente trabalha na área de fertirrigação de pastagens com águas residuárias, mudanças climáticas e seus impactos na agropecuária, modelagem do crescimento de plantas forrageiras e fertilidade do solo.

7. Catariny Cabral Aleman. Engenheira Agrônoma pela Universidade do Oeste Paulista (Unoeste, 2009), Mestre em Agronomia com área de concentração em Produção Vegetal (Unoeste, 2011) e Doutora em Ciência com área de concentração Engenharia de Sistemas Agrícolas (Esalq/USP, 2015). Atualmente é Professora Adjunto I da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, com experiência em Engenharia Agrícola, atuando nas áreas de Irrigação, Hidráulica, Manejo de Irrigação, Irrigação de Precisão e Viabilidade Econômica do Uso da Irrigação. Chefe do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

8. Daniel Fonseca de Carvalho. Professor Titular do Departamento de Engenharia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Engenheiro Agrícola, Mestre (1993) e Doutor (1998) em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Federal de Viçosa. É bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq (nível 1D) (2019-2023) e bolsista da FAPERJ no programa Cientista do Nosso Estado (2018-2021).

9. Danielle Morais Amorim. Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (2013), Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (2015). Foi bolsista de extensão pelo CNPq na modalidade EXP C atuando na mobilização e capacitação de grupos em comunidades, promovendo o planejamento, desenvolvimento e execução de projetos agroambientais. Atualmente é doutoranda da Esalq/USP.

10. Dionei Lima Santos. Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Mestre e Doutor em Engenharia Agrícola pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Conceição do Araguaia, PA.

11. Durval Dourado Neto. Engenheiro Agrônomo (1984) pela UFV, Mestre (Irrigação e Drenagem, 1989) e Doutor (Solos e Nutrição de Plantas, 1992) pela Esalq/USP e Pós-Doutor em física do solo e modelagem em agricultura pela Universidade da Califórnia (1993-1995). Professor Titular e Diretor da Esalq/USP. Coordenador do Grupo de Políticas Públicas (GPP/Esalq/USP) para o desenvolvimento de inteligência estratégica e espacial no apoio à decisão da interface agricultura e meio ambiente. Atua em modelagem de sistemas agrícolas.

12. Edmar José Scaloppi. Engenheiro Agrônomo, Professor Titular de Irrigação e Drenagem da FCA/Unesp, Botucatu, Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela Esalq/USP, Doutor em Ciências pela Unesp, Ph.D. em Engenharia de Irrigação pela Utah State University, Pós-Doutorado na Utah State University e University of California, Davis, EUA, Consultor técnico-científico do Centro Nacional de Engenharia Agrícola, presidente da Comissão de Estudos de Irrigação e Drenagem da ABNT, membro de Comitê Assessor do CNPq.

13. Elias Fernandes de Sousa. Engenheiro Agrícola (1989) e Mestre (1993) em Engenharia Agrícola pela UFV, e Doutor (1997) em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (Uenf) e Pós-doutoramento na Universidade da Califórnia, Davis, CA (2016). É professor titular da Uenf. Atua na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Irrigação e Drenagem, nos temas: irrigação, manejo de irrigação, agricultura irrigada.

14. Eugênio Ferreira Coelho. Engenheiro Agrícola e Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV, e Doutor em Engenharia de irrigação pela Universidade do Estado de Utah (EUA). Atualmente é membro do corpo docente da Pós-graduação do Centro Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, professor do curso de Pós-graduação em Produção vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, IF Baiano e pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

15. Eusímio Felisbino Fraga Júnior. Engenheiro Agrônomo (FAZU), Mestre e Doutor em Irrigação e Drenagem (Esalq/USP). Atualmente é Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias na Universidade Federal de Uberlândia UFU/Campus Monte Carmelo. Atua principalmente nas áreas de: Engenharia de Água e Solo, Agrometeorologia, Relações hídricas dos cultivos/Cafeicultura Irrigada e Estresse Hídrico/Irrigação deficitária.

16. Everardo Chartuni Mantovani. Engenheiro Agrícola (1981) e Mestre (Engenharia Agrícola, 1986) pela UFV e Doutor (Agronomia – Manejo da Irrigação, 1993) pela Universidade de Córdoba Espanha. Professor (desde 1983) Titular Sênior do DEA-UFV. Coordenou por 20 anos o GESAI (Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada) - DEA/UFV. Em 2008 criou a empresa Irriplus Tecnologia e Treinamento Ltda na Incubadora de Empresas Tecnológicas da UFV e é o idealizador e criador da empresa IRRIGER, hoje empresa do grupo Valmont. Atual presidente da Abid – Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem.

17. Felipe Cardoso de Oliveira Maia. Engenheiro Agrônomo (2016) pela UnB, Mestre em Produção Sustentável, com foco em Geotecnologias e Manejo da Água e Solo (2018) pela UnB, e Doutorando em Agronomia pela UnB. Bolsista DTI em Irrigação, zoneamento edafoclimático

e sensoriamento remoto para eficiência de uso de água da cana-de-açúcar no Cerrado (Embrapa Cerrados, 2021).

18. Fernando Campos Mendonça. Engenheiro Agrônomo pela Esalq/USP (1990), Mestre e Doutor em Irrigação Drenagem pela Universidade de São Paulo (1994 e 1999). Ex-professor substituto da Universidade Federal de Uberlândia (UFU-1998-2000). Pós-doutorado em Reúso Agrícola de Águas Residuárias (2001-2002). Ex-professor da Universidade do Oeste Paulista (Unoeste-2003-2005). Ex-pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste (2005-2010). Atualmente é professor da Esalq/USP.

19. Fernando França da Cunha. Engenheiro Agrônomo (2003), Mestre (2005) e Doutor (2009) em Engenharia Agrícola pela UFV. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa atuando em disciplinas de graduação e pós-graduação. É membro efetivo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) onde orienta estudantes de mestrado e doutorado. É bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 2 e suas pesquisas são relacionadas à manejo e engenharia de irrigação.

20. Gustavo Fanelli Hossri. Engenheiro Agrônomo pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq/USP), premiado com honra "Alexandre von Pritzelwitz". Atua no segmento de irrigação há 10 anos, com especialidade na área de tecnologia de aplicação de água. Responsável por iniciar e desenvolver o mercado da multinacional austríaca Komet Irrigation no Brasil, gerenciando atualmente o mercado da América do Sul.

21. Jarbas Honorio de Miranda. Engenheiro Agrônomo. Professor Associado do Departamento de Engenharia de Biosistemas Esalq/USP. Possui Especialização em Irrigação e Drenagem pelo Curso Internacional Convênio Brasil-Espanha. Mestre e Doutor em Irrigação e Drenagem pela Esalq/USP e Pós-Doutorado em Irrigação e Drenagem, junto ao Department of Agricultural and Biological Engineering (ABE), University of Illinois em Urbana-Champaign (EUA). Desde 2012 é Membro da American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE-EUA) e Membro do ASABE Committee SW-23 Drainage (EUA).

22. João Carlos Cury Saad. Engenheiro Agrônomo pela FCA - Campus de Botucatu - Unesp (1986), Mestre (1990) e Doutor (1993), em Irrigação e Drenagem, pela Esalq/USP. Realizou Pós-doutorado na Universidade da Califórnia, Davis, de 1999 a 2001. Obteve o título de livre-docente pela Unesp, em 2002. Professor Titular em 2017. Foi Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem e Diretor da FCA - Campus de Botucatu - Unesp.

23. José Antônio Frizzone. Engenheiro Agrônomo (1977) e Mestre em Engenharia Agrícola (1979), pela UFV, Doutor em Agronomia (1986) pela Esalq/USP. Atua como professor Universitário desde 1978. Atualmente é Professor Titular aposentado pela Esalq/USP onde desenvolve atividades de ensino e pesquisa como Professor Sênior no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas. Durante sua carreira universitária publicou 270 artigos científicos e orientou 110 alunos de pós-graduação.

24. Jose Giacoia Neto. Engenheiro Agrícola. Mestre em Irrigação e Drenagem (UFV). MBA em Gestão Comercial (FGV/Ohio State University). Gerente Internacional de Negócios para a América Latina pela Rain Bird International. Possui mais de 25 anos de experiência em irrigação técnica para áreas paisagísticas e esportivas. Entre suas principais realizações no setor estão a concepção e assessoria de projetos de irrigação que foram instalados em áreas públicas em mais de oito países com destaque para os 11 estádios usados na Copa do Mundo de 2014.

25. Juliano Dalcin Martins. Engenheiro Agrônomo. Mestre. Doutor. Professor do Departamento de Engenharia Rural da UFSM. Doutor em Engenharia Agrícola pela UFSM e Instituto Superior de Agronomia - Universidade de Lisboa. Sua linha de pesquisa está

relacionada Manejo da Água em Sistemas Agrícolas, trabalhando com modelação do balanço hídrico do solo e tecnologias visando melhorar a gestão da água em sistemas agrícolas.

26. Laura Elizabeth Christianson. Ph.D., Professora Afiliada, Department of Crop Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign, Engenheira profissional licenciada no Estado de Illinois. Com formação em engenharia agrícola, trabalhou anteriormente no projeto de biorreatores de marvalhas de madeira para remoção de nitrato de fontes pontuais e difusas. Como engenheira de pesquisa, estudou opções para melhorar a qualidade da água de drenagem de valas no Meio-Atlântico.

27. Luciano Alves de Oliveira. Engenheiro Agrônomo (Esalq/USP), Mestre e Doutor em Ciências em Engenharia de Sistemas Agrícolas (Esalq/USP). Atualmente trabalhando como Pesquisador Associado de Pós-doutorado, junto ao Department of Crop Sciences, University of Illinois em Urbana-Champaign. Membro do Programa de Pesquisa e Extensão de Drenagem de Illinois (I-DROP) desde 2020.

28. Luís César Dias Drumond. Engenheiro agrônomo pela UFV (1986), Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV (1989) e Doutor em Agronomia pela Unesp-Jaboticabal (2003). Foi professor e pesquisador da Universidade de Uberaba e da FAZU. Publicou vários artigos em periódicos especializados e trabalhos em anais de eventos. Escreveu 6 capítulos de livros e 10 livros. Participou de vários eventos no exterior no Brasil. Atua principalmente na área de produção bovina intensiva irrigada. Atualmente é professor na UFV.

29. Luís Henrique Bassoi. Engenheiro Agrônomo (Esalq/USP), Mestre em Agronomia / Irrigação e Drenagem (FCA/Unesp), Doutor em Ciências (Cena/USP), Pós-doutorado (UC Davis, USA). Pesquisador da Embrapa Semiárido, em Petrolina-PE (1994 a 2015) e da Embrapa Instrumentação, em São Carlos-SP (desde 2015). Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da FCA/Unesp Botucatu.

30. Luiz Fabiano Palaretti. Engenheiro Agrônomo, Mestre e Doutor pela Universidade Federal de Viçosa. Pós Doutor em Irrigação pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". É Professor do Departamento de Engenharia de Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (Unesp), campus Jaboticabal. Atua nas áreas de Recursos Hídricos, hidráulica agrícola e fertirrigação. Nessas áreas, tem orientado estudantes de ensino técnico, graduação e Pós-Graduação. Possui parcerias com empresas públicas e privadas para desenvolvimento da agricultura irrigada.

31. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. Professor Titular do Departamento de Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Engenheiro Agrícola com Mestrado em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Escola Superior de Agricultura de Lavras e Doutor em Engenharia Agrícola (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Federal de Viçosa.

32. Maicon Fábio Appelt. Engenheiro Agrônomo pela UFV (2012), Mestre pela UFV (2014), Especialização em Nutrição de Ruminantes pela Fazu (2016). Atua nas áreas de pastagem, forragicultura, fertilidade do solo e recursos hídricos, com ênfase em fertirrigação e uso de águas residuárias. Ministrou várias palestras em eventos técnicos no Brasil e Exterior. Participou da organização de eventos e atualmente realiza consultorias ligadas a irrigação, uso de água residuária e produção animal a pasto.

33. Marcela Almeida de Araujo. Economista, Mestre em Agronomia e Doutoranda em Economia Aplicada (Esalq/USP). Atua em projetos ligados a análise de políticas públicas e desenvolvimento rural sustentável. Tem experiência com gestão de projetos, levantamento de dados primários, sistema de informações espaciais, modelagem econômica e de sistemas agrícolas.

34. Marco Antônio Fonseca Conceição. Engenheiro Civil (1983) pela Universidade de Uberaba, Mestre (1988) em Engenharia Agrícola pela UFV e Doutor (2002) em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela Esalq/USP. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desde 1988, estando lotado atualmente na Embrapa Uva e Vinho/Estação Experimental de Viticultura Tropical (EVT), em Jales, SP.

35. Marcus Henrique Tessler. Doutor em Agricultura e Biosistemas pelo Departamento de Engenharia da Universidade do Arizona (1994). Diretor do departamento de Invernaderos estufas (Netafim, México, 2007-2012). Diretor de Desenvolvimento de Negócios (Netafim, Brasil, 2012-2018). Desde 2018 é o CEO da Netafim Argentina.

36. Maurício Antônio Coelho Filho. Engenheiro Agrônomo pela UFBA, Mestre e Doutor em Agronomia/Irrigação e Drenagem pela Universidade de São Paulo (1998/2020). Pesquisador visitante de Rothamsted Research (UK) nos anos de (2011 a 2013). Pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura e professor permanente em cursos de PG (Engenharia Agrícola: UFRB e Produção Vegetal no Semiárido: IFBaiano, Guanambi). Experiência nos estudos de manejo de Irrigação, tolerância de plantas aos estresses abióticos e zoneamento de risco climático.

37. Mirta Teresinha Petry. Engenheira Agrônoma, Doutora, Professora Associada do Departamento de Engenharia Rural e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFSM. Obteve o título de doutora em Ciência do Solo na UFSM em 2004. É líder do grupo de pesquisa Manejo da Água em Sistemas Agrícolas, trabalhando com modelação do balanço hídrico do solo e tecnologias visando melhorar a gestão da água em sistemas agrícolas.

38. Patricia Angélica Alves Marques. Engenheira Agrônoma, Mestre e Doutora em Irrigação e Drenagem pela Esalq/USP. Professora Associada (INCT-EI e LEB/Esalq/USP) atua na graduação e na Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas (PPGESA). Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em softwares, inteligência artificial e modelos para Engenharia de Água no Solo, manejo da Irrigação, e viabilidade econômica da irrigação.

39. Paulo Cesar Sentelhas. Engenheiro Agrônomo, Mestre em Agrometeorologia, Doutor em Irrigação e Drenagem, pela Esalq/USP, Pós-doutorado em Agrometeorologia pela Universidade de Guelph, Canadá. Foi pesquisador do IPMet/Unesp, do IAC e da Weather Innovations. Desde 1996 é professor da Esalq/USP, sendo Professor Titular da área de Agrometeorologia. É pesquisador de produtividade do CNPq, nível 1A, e Editor-Chefe da revista Scientia Agrícola, da Esalq/USP.

40. Pedro Abel Vieira Júnior. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desde 1989 com experiência na área de agronomia (sementes e mudas, modelagem agrícola com ênfase na previsão do clima e negócios tecnológicos). Após 2002, ainda na Embrapa, desenvolve trabalhos em socioeconômica com ênfase em gestão integrada do risco agrícola, bioenergia, desenvolvimento regional, comércio agrícola internacional e cenário para agricultura.

41. Pedro Alves Quilici Coutinho. Engenheiro Agrônomo pela (Esalq/USP). Atua em projetos referentes ao desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao meio rural. Possui experiência em geoprocessamento, modelagem espacial e análises estatística de dados.

42. Regina Célia de Matos Pires. Engenheira Agrônoma (Faculdade de Agronomia e Zootecnia Manuel Carlos Gonçalves - 1984), Mestre e Doutora em Agronomia (Área de Irrigação e Drenagem) pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (Esalq/USP). Pesquisadora científica e Diretora do Centro de Pesquisa de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo (IAC). Professora do Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do IAC.

43. Reimar Carlesso. Engenheiro Agrônomo, Ph.D. na Michigan State University (EUA). Professor convidado do Departamento de Engenharia Rural da UFSM, CEO da Irriga Global, empresa de manejo e monitoramento da irrigação que utiliza tecnologia desenvolvida na UFSM, com atuação em 20 países, nos seguintes continentes: África, América Latina, Ásia e Europa.

44. Renato Silva. Profissional com 20 anos de experiência no Agronegócio Brasileiro, com uma carreira sólida criada na área comercial e desenvolvimento de rede desenvolvida em grandes grupos como Case New Holland, Valmont e Pampa Capital, assim como com experiência em *turn around* e fusões e aquisições. Atualmente é presidente da Valmont Brasil, da Câmara Setorial de Equipamentos e Irrigação (CSEI) da Abimaq e membro do Conselho do Agronegócio da Fiesp. Além disso, é o atual Presidente do Conselho de Administração da Solbras, Empresa recém adquirida pela Valmont.

45. Roberto Figueiras. Engenheiro Agrícola e Ambiental formado pela Universidade Federal de Minas Gerais UFMG (2013), Mestre em Agronomia (irrigação e drenagem) na linha de geoprocessamento, pela Universidade Estadual Paulista Unesp (2016). Doutor em Engenharia Agrícola, com foco em manejo da agricultura irrigada via sensoriamento remoto, pela Universidade Federal de Viçosa UFV. Possui experiência na área de recursos hídricos, agrometeorologia, agricultura de precisão, irrigação de precisão, sensoriamento remoto, sistema de informação geográfica, geoestatística e machine learning.

46. Roberto Rodrigues. Engenheiro Agrônomo pela Esalq/USP (1965), Agricultor, Doutor Honoris Causa pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho - Unesp/Campus de Jaboticabal (1998). Ministro da Agricultura de 2003 a 2006. Coordenador do Centro de Agronegócio da Fundação Getúlio Vargas - FGVAGRO/EESP (desde 2006) e Embaixador Especial da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura - FAO (desde 06/2012) para as Cooperativas.

47. Rodnei Rizzo. Engenheiro Agrônomo, Mestre (Solos e Nutrição de Plantas) e Doutor (Ecologia Aplicada) pela USP, Pós-doutorando pela Esalq/USP. No setor privado, atuou como Analista de Geoprocessamento Sênior, desenvolvendo projetos de prospecção de terras para implantação de culturas bioenergéticas.

48. Rodrigo Moura Pereira. Engenheiro Agrícola pela UEG (2012), Mestre em Agronomia, com foco em Solo e Água (UFG, 2015). Especialização em Recursos Hídricos (UnB, 2018). D.Sc. em Agronomia, com foco em Produção Sustentável (UnB, 2021). Bolsista DTI em irrigação, zoneamento edafoclimático e sensoriamento remoto para eficiência de uso da água da cana-de-açúcar no Cerrado (Embrapa Cerrados, 2021).

49. Rodrigo Ribeiro Franco Vieira. Engenheiro Agrônomo formado em 1987 na EAUFBA, em Cruz das Almas, Bahia, especialista em irrigação pelo PROINE (1989). Sempre atuante na área da agricultura irrigada, nos setores público (Codevasf) e privado, como projetista hidráulico, autor de diversos estudos de eficiência energética e uso da água. Consultor, autor do livro "Manual de Válvulas Hidráulicas", único em português. Atualmente buscando implantar a cultura da análise correta dos transientes hidráulicos na agricultura irrigada.

50. Rubens Alves de Oliveira. Engenheiro Agrícola (1984) e Engenheiro Agrônomo (1986), Mestre (1991) e Doutor (1996) em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Titular, foi coordenador do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental (2002 a 2004) e Chefe do Departamento de Engenharia Agrícola (2011 a 2013). Diretor do Centro de Ciências Agrárias, Gestão (2013 a 2017) e (2017 a 2021), preside a Câmara de Ensino e o Conselho Departamental desse Centro. Membro do Conselho Universitário (CONSU) e do Conselho de Ensino, Pesquisa e Extensão (CEPE) da Universidade Federal de Viçosa.

51. Rubens Duarte Coelho. Professor Titular da Esalq/USP - Departamento de Engenharia de Biosistemas. Engenheiro Agrônomo pela USP (1986), Mestre em Irrigação e Drenagem pela

USP (1990), Doutor em Engenharia Hidráulica USP/ University of Nebraska USA (1996), ministrando 2 disciplinas de graduação e 4 disciplinas de pós-graduação. Membro das Sociedades Brasileira e Americana de Engenharia Agrícola (SBEA / ASABE). Total de 89 orientações já concluídas, sendo 29 Doutorados, 25 Mestrados, 3 Pós-Doutorados e 32 Iniciações científicas (IC). Presidente da Comissão de Convênios da Esalq e Bolsista Produtividade Pesquisa do CNPq.

52. Salassier Bernardo. Engenheiro Agrônomo (1967) pela UFRRJ, mestre em Irrigação (1969) pela University of California, Davis, USA, Ph.D. em Irrigação (1975) pela Utah State University, Logan, USA e pós-doutor (1987) pelo Institute of Irrigation Studies, da University of Southampton, UK. Ex-professor titular da UFV, onde foi chefe do DEA, presidente do Conselho de Pós-Graduação e coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. É ex-bolsista do CNPq (1A) e autor do livro Manual de Irrigação. Ex-professor titular da Universidade Estadual do Norte Fluminense, onde foi também coordenador do Curso de Pós-Graduação em Produção Vegetal e reitor de 1999 a 2003.

53. Sergio Nascimento Duarte. Professor de Hidráulica, Hidrologia e Drenagem Agrícola no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Esalq/USP. Mestre em Irrigação e Drenagem pela Esalq/USP e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Tem trabalhado com fertirrigação e salinização em ambientes protegidos, drenagem agrícola e Hidrologia de pequenas bacias hidrográficas. É bolsista de produtividade do CNPq.

54. Verônica Gaspar Martins Leite de Melo. Engenheira Agrônoma, Mestre (2019) e Doutoranda em Engenharia de Sistemas agrícolas pela Esalq/USP.

55. Vinicius Bof Bufon. Engenheiro Agrícola (2003), Mestre em Engenharia Agrícola (Recursos Hídricos e Irrigação, 2005) pela Universidade Federal de Viçosa, e Ph.D. em Agronomia (Eficiência de uso de água na produção agrícola, 2009) pela Texas Tech University. Atualmente é pesquisador da Embrapa Cerrados, atuando principalmente no desenvolvimento de sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar para o Cerrado, e de ferramentas de sistema de informação geográfica, sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para suporte à gestão da eficiência de uso de água.

56. Welson Lima Simões. Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é pesquisador da Embrapa Semiárido na área de irrigação e drenagem.

ORGANIZAÇÃO



Patrocínio



Apoio



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO
REGIONAL

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



APRESENTAÇÃO

Os dois livros da obra “Diferentes Abordagens sobre Agricultura Irrigada no Brasil” nos levam em uma viagem pela história e evolução da agricultura irrigada de seus primórdios aos dias de hoje.

A exposição didática e a visão integradora, tão peculiares ao ex-Ministro Alysso Paolinelli, nos atualizam com objetividade, técnica e vasto conteúdo, abordando o assunto em suas múltiplas dimensões.

Em tempos de agricultura 4.0 e de valorização de temas ambientais, tratar de irrigação é trazer ao público interessado o embasamento necessário para um agronegócio moderno, que otimize recursos de todas as ordens e garanta produtividade com a sustentabilidade exigida pelo momento histórico.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Esalq/USP) presta o merecido reconhecimento ao ex-Ministro Alysso Paolinelli, ao nomeá-lo como titular da Cátedra Luiz de Queiroz aproveitando toda sua experiência de cientista e de homem público a serviço da agricultura e da economia brasileira.

Com incontestáveis serviços prestados ao Brasil, Alysso Paolinelli tornou-se uma referência internacional quando se fala de produtividade e sustentabilidade, pois ao longo de sua vida, quer no meio acadêmico, quer no exercício de cargos executivos no âmbito estadual e federal, implantou políticas, criou órgão de pesquisa e exerceu tão singelamente o exercício da cátedra, de forma prática, eficaz e inovadora.

Estou certo de que essa obra será de grande utilidade não somente ao meio acadêmico, como peça de referência sobre o assunto, mas para o agronegócio como um todo, do pequeno produtor ao grande fazendeiro. Essa contribuição ultrapassa as cercas e porteiros das propriedades agrícolas e será de utilidade também para a gestão pública, a agroindústria, enfim, para todos os setores sob a crescente influência do agronegócio brasileiro.

Como estudioso da História e da Economia e na qualidade de Presidente do Conselho Nacional da Amazônia Legal, cuja missão é coordenar esforços dos órgãos federais para proteger, preservar e desenvolver a Amazônia Legal, acredito que o Brasil está destinado a alimentar parcela crescente da população mundial, contando com sistemas agrícolas cada vez mais competitivos, sustentáveis e resilientes.

Por isso, sinto-me privilegiado ao apresentar uma coletânea que descortina ao leitor a agricultura do século 21, com o embasamento necessário para o perfeito entendimento da importância da irrigação para a economia do País, para a sustentabilidade e preservação do meio ambiente e, em última análise, para a sobrevivência e prosperidade humana.

Antonio Hamilton Martins Mourão

Vice-Presidente da República

PREFÁCIO

Há cerca de 6 mil anos, na Mesopotâmia, região que hoje compreende o Iraque e parte do que é chamado Crescente Fértil, colonos construíram canais e desviaram a água do Rio Eufrates para suas plantações, iniciando a prática da irrigação. E a irrigação transformou a terra e a sociedade como nenhuma outra atividade havia feito até então. A prática viabilizou a produção confiável de alimentos e permitiu que parte das pessoas pudesse trabalhar em atividades diferentes da agricultura.

Avaliada de maneira isolada, a irrigação talvez seja a mais importante intervenção benéfica promovida intencionalmente pelo homem sobre o seu ambiente. Ao longo do tempo, ela passou por vários processos de desenvolvimento e foi se adaptando a diferentes circunstâncias. Atualmente, faz parte de um conjunto de tecnologias que contribuem efetivamente para suprir a crescente demanda por alimentos no planeta, com participação significativa nos aumentos de produção e produtividade agrícola em escala global.

A intensificação da agricultura, aliada à redução dos impactos ambientais, é a estratégia mais adequada para aumentar a produção mundial de alimentos de forma sustentável. Entre as várias tecnologias envolvidas nesse processo, a irrigação é, sem dúvida, uma das principais. Em regiões como o Cerrado brasileiro, é a irrigação que possibilita a produção com ganhos de produtividade em qualquer época do ano.

A agricultura irrigada induz, direta ou indiretamente, a um maior aporte de tecnologias, inovações e conhecimentos, bem como ao aprimoramento de capacidades, o que contribui para a intensificação das práticas agrícolas com gradativas inserções de técnicas e manejos associados aos conceitos do desenvolvimento sustentável.

No mundo, a agricultura irrigada é responsável por cerca de 40% de toda a produção, viabilizando uma produtividade até quatro vezes superior à agricultura de sequeiro. A fim de se produzir o equivalente à produção média adicional proveniente das áreas irrigadas, seria necessário expandir a atual área de sequeiro em cerca de 300 milhões de hectares.

Além de trazer significativos benefícios ambientais, aumentos de produtividade contribuem de forma concreta para a promoção do desenvolvimento regional e da melhoria da qualidade de vida das pessoas. Promovem o crescimento do produto interno bruto e a redução da pobreza. O potencial de crescimento da agricultura irrigada no nosso País é imenso.

Aos poucos, os desafios existentes aos avanços na implantação de áreas irrigadas vão sendo equacionados entre o poder público e os irrigantes. Acredita-se que, no curto prazo, seja possível dobrar, de forma sustentável, o nosso incremento anual de área irrigada, tendo em vista a capacidade instalada da indústria, a infraestrutura existente (transporte, energia e capacidade de armazenamento) e a disponibilidade de mão-de-obra capacitada, terras aptas e recursos hídricos no Brasil.

Este livro é um material inédito e foi elaborado com o objetivo de trazer conhecimentos que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Brasil. Para isso, buscou-se congrega profissionais, tanto da iniciativa privada quanto do setor público, que trazem abordagens diferenciadas sobre os principais temas correlatos à agricultura irrigada.

De forma geral, a Obra contextualiza a importância da agricultura irrigada no crescimento da agropecuária brasileira e na produção de alimentos para o mundo,

demonstrando que a irrigação é uma das tecnologias que permitirão a intensificação da produção agrícola no último grau de tecnologia, dando segurança ao produtor rural no investimento em suas lavouras, desde a semeadura à colheita e à comercialização.

Além disso, a irrigação blinda os produtores rurais dos impactos do aquecimento global, na medida em que reduz o risco climático associado à produção. Permite, ainda, a realização de duas – ou até três - safras de grãos por ano na mesma terra, sem quebra de produção, e proporciona a produção de hortifrutigranjeiros durante o ano inteiro.

Em síntese, o presente livro traz em seus capítulos o papel do governo na implantação da Política Nacional de Irrigação, além das experiências dos irrigantes e de dados e informações sobre como podemos avançar com a irrigação, o desenvolvimento em pesquisa e tecnologia e muito mais.

Numa reflexão sobre esta publicação, o leitor poderá perceber que ela representa, em sua essência, o princípio agregador e visionário do ex-ministro Alysso Paolinelli, que deixa aqui mais um legado para a agricultura brasileira.

Tereza Cristina Corrêa da Costa Dias
Ministra da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Técnica e Cultura

SUMÁRIO

Parte I - TÉCNICA

CAPÍTULO 1

1	A revolução azul no contexto da agricultura irrigada	3
	<i>Rubens Duarte Coelho</i>	
	Resumo	3
1.1	Introdução	3
1.2	A irrigação no mundo antigo	3
1.3	A agricultura irrigada na era moderna	5
1.4	A revolução verde na agricultura	6
1.5	A revolução azul e a pegada hídrica na agricultura	6
1.6	O sistema híbrido de irrigação: pivô central e gotejamento	8
1.7	A eficiência do uso da água na agricultura	11
1.8	Fotossíntese: plantas C ₃ e C ₄	12
1.9	Implementação da revolução azul	13
1.10	O milagre azul da bioenergia	15
1.11	Irrigação de precisão	19
1.12	Agricultura aérea de precisão em áreas irrigadas	22
1.13	Considerações finais	23
	Referências	24

CAPÍTULO 2		
2	Pivô central: história, mercado, tecnologia e futuro	29
	<i>Renato Silva</i>	
	Resumo	29
2.1	Introdução	29
2.2	História	32
2.3	Mercado	33
2.4	Tecnologia	35
2.5	Rede de distribuição	36
2.6	Governança	37
2.7	Futuro responsável	37
2.8	Considerações finais	38
	Referências	39

CAPÍTULO 3		
3	Irrigação por gotejamento: histórico e evolução tecnológica	41
	<i>Marcus Henrique Tessler</i>	
	Resumo	41
3.1	Introdução	41
3.2	Desenvolvimento tecnológico dos gotejadores	43
3.3	Gotejadores	44
3.4	Vazão dos gotejadores	48
3.5	Princípios da irrigação por gotejamento (Engenharia e Agronomia)	48
3.6	Conceito do solo como reservatório	53
3.7	Sistema radicular sob irrigação por gotejamento	55
3.8	O solo como alvo	56
3.9	Fertirrigação, nutrição e <i>drip protection</i>	57
3.10	Considerações sobre a forma de aplicação de fertilizantes	60
3.11	Reflexões sobre o futuro da tecnologia de irrigação por gotejamento	61
3.12	Considerações finais	63
	Referências	63

CAPÍTULO 4		
4	O manejo da irrigação e o futuro da agricultura irrigada	65
	<i>Daniel Fonseca de Carvalho e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira</i>	
	Resumo	65
4.1	Introdução	65
4.2	Manejo da água baseado em dados climáticos	66
4.3	Manejo da água baseado no balanço de água no solo	69
4.4	Manejo da água a partir de informações na planta	71
4.5	Manejo da irrigação com acionamento automático	74
4.6	Irrigação com <i>deficit</i> controlado	75
4.7	Considerações finais	76
	Referências	77

CAPÍTULO 5

5	A evolução da irrigação mecanizada moldando os rumos da tecnologia de aplicação	81
	<i>Gustavo Fanelli Hossri</i>	
	Resumo	81
5.1	Introdução	81
5.2	Pivô central: dinâmica e operacionalidade	84
5.3	Pivô central: tecnologia de aplicação	85
5.4	Considerações finais	91
	Referências	91

CAPÍTULO 6

6	Projeto e execução de sistemas de drenagem agrícola	93
	<i>Jarbas Honorio de Miranda, Laura Elizabeth Christianson e Luciano Alves de Oliveira</i>	
	Resumo	93
6.1	Introdução	93
6.2	Drenagem de terras agrícolas	93
6.3	Considerações finais	107
	Referências	107

CAPÍTULO 7

7	Irrigação e fertirrigação em ambiente protegido	111
	<i>Sergio Nascimento Duarte</i>	
	Resumo	111
7.1	Introdução	111
7.2	O cultivo em estufas agrícolas	112
7.3	Irrigação em estufas	112
7.4	Fertirrigação em estufas	120
7.5	Considerações finais	126
	Referências	127

CAPÍTULO 8

8	Subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional	133
	<i>João Carlos Cury Saad</i>	
	Resumo	133
8.1	Introdução	133
8.2	Sequência sugerida	134
8.3	Espaçamento entre aspersor	134
8.4	Definição da área efetivamente irrigada	134
8.5	Lâmina líquida e lâmina bruta	134
8.6	Turno de irrigação	135
8.7	Vazão do projeto	135
8.8	Configuração da rede hidráulica	135
8.9	Esquema operacional, número de posições irrigadas e ajuste dos dados	136
8.10	Seleção do aspersor e suas características operacionais	137
8.11	Hidráulica de tubulações com múltiplas saídas	137
8.12	Dimensionamento da linha lateral	141
8.13	Condição operacional crítica	145
8.14	Dimensionamento da linha principal	145
8.15	Cálculo da altura manométrica total	146
8.16	Potência do conjunto motobomba	146
8.17	Estudo de caso: dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão convencional com linhas laterais emparelhadas em desnível	146
8.18	Considerações finais	153
	Agradecimentos	153
	Referências	154

CAPÍTULO 9

9	Irrigação com <i>deficit</i>	155
	<i>Luís Henrique Basso</i>	
	Resumo	155
9.1	Introdução	155
9.2	Irrigação com <i>deficit</i> : considerações sobre o seu uso	156
9.3	Aspectos econômicos	156
9.4	Produtividade da água e sua relação com a irrigação com <i>deficit</i>	159
9.5	Irrigação com <i>deficit</i> no Semiárido do Brasil	160
9.6	Estratégias de irrigação com <i>deficit</i>	160
9.7	Respostas fisiológicas e morfológicas das plantas ao <i>deficit</i> hídrico	161
9.8	Respostas de culturas ao <i>deficit</i> hídrico	162
9.9	Considerações finais	168
	Referências	169

CAPÍTULO 10

10	Irrigação de baixo custo por sulcos	175
	<i>Edmar José Scaloppi</i>	
	Resumo	175
10.1	Introdução	175
10.2	O processo de irrigação de baixo custo por sulcos	179
10.3	Preparo da área a ser irrigada	180
10.4	Classificação do sistema de irrigação de baixo custo por sulcos	180
10.5	Composição do sistema de irrigação	181
10.6	Dimensionamento de sistemas de irrigação de baixo custo por sulcos	183
10.7	Determinação do comprimento dos sulcos	184
10.8	Considerações finais	191
	Referências	192

CAPÍTULO 11

11	Variabilidade e mudanças climáticas no contexto da agricultura irrigada	195
	<i>Paulo Cesar Sentelhas</i>	
	Resumo	195
11.1	Introdução	195
11.2	Variabilidade, tendências, anomalias e mudanças climáticas	196
11.3	Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas	202
11.4	Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no requerimento hídrico das culturas	203
11.5	Irrigação como estratégia de mitigação das mudanças climáticas	206
11.6	Mudanças climáticas e a expansão da agricultura irrigada no Brasil	208
11.7	Considerações finais	210
	Referências	210

CAPÍTULO 12

12	Manejo da irrigação no Brasil: aplicações, desafios e tendências para o futuro	215
	<i>Mirta Teresinha Petry, Reimar Carlesso e Juliano Dalcin Martins</i>	
	Resumo	215
12.1	Introdução	215
12.2	Requerimento hídrico e o manejo da irrigação	216
12.3	Programação ou calendarização da irrigação	217
12.4	Manejo da irrigação baseado no status de água no solo: medida do conteúdo ou da tensão de água no solo	218
12.5	Manejo da irrigação com base na planta: o <i>status</i> de água na planta	222
12.6	Manejo da irrigação baseado em parâmetros meteorológicos: método da ETc	223
12.7	Métodos combinados do manejo da irrigação	228
12.8	Considerações finais	229
	Referências	230

CAPÍTULO 13

13	Tecnologias digitais para monitoramento da irrigação	235
	<i>Catariny Cabral Aleman, Fernando França da Cunha, Rubens Alves de Oliveira e Roberto Filgueiras</i>	
	Resumo	235
13.1	Introdução	235
13.2	Sensoriamento remoto aplicado à irrigação	236
13.3	Sensoriamento remoto orbital na agricultura irrigada	237
13.4	Sensoriamento remoto aéreo na agricultura irrigada	239
13.5	Sensoriamento remoto proximal na agricultura irrigada	240
13.6	Modelos e algoritmos para análise de imagens na agricultura irrigada	241
13.7	Inteligência artificial aplicada ao manejo de irrigação	243
13.8	Automação de sistemas de irrigação	246
13.9	Aplicação de água em taxa variável	248
13.10	Considerações finais	249
	Agradecimentos	249
	Referências	249

CAPÍTULO 14

14	Os transientes hidráulicos e a agricultura irrigada	251
	<i>Rodrigo Ribeiro Franco Vieira</i>	
	Resumo	251
14.1	Introdução	251
14.2	Definição	252
14.3	Ondas de pressão	255
14.4	Entendendo as soluções	259
14.5	Estudos de casos - exemplos reais	268
14.6	Considerações finais	274
	Referências	274

CAPÍTULO 15

15	Produtividade da água na agricultura irrigada	277
	<i>José Antônio Frizzone e Verônica Gaspar Martins Leite de Melo</i>	
	Resumo	277
15.1	Introdução	277
15.2	Eficiência da irrigação	278
15.3	Produtividade da água na agricultura	279
15.4	Eficiência da irrigação	280
15.5	Produtividade da água	285
15.6	Fatores que afetam a produtividade da água	289
15.7	Técnicas para aumentar a produtividade da água	292
15.8	Considerações finais	293
	Referências	294

CAPÍTULO 16

16	Eficiência de uso da água na agricultura irrigada	299
	<i>Salassier Bernardo, Elias Fernandes de Sousa e Everardo Chartuni Mantovani</i>	
	Resumo	299
16.1	Introdução	299
16.2	Meio ambiente	301
16.3	Benefício da irrigação	302
16.4	Salinização do solo	303
16.5	Contaminação dos recursos hídricos	304
16.6	Disponibilidade de água	305
16.7	Manejo de irrigação e o sistema solo-planta-atmosfera	306
16.8	Relação entre produtividade e disponibilidade de água	308
16.9	Maximização da produtividade por unidade de água aplicada	309
16.10	Maximização da produtividade por unidade de área	310
16.11	Maximização dos lucros	311
16.12	Otimização da eficiência de uso da água na agricultura	311
16.13	Funções de produção	312
16.14	Otimização física	313
16.16	Otimização econômica	313
16.16	Ponto de equilíbrio	314
16.17	Obtenção de dados no campo	314
16.18	Eficiência do uso de água	315
16.19	Rendimento por unidade de lâmina aplicada	315
16.20	Produtividade na agricultura irrigada	316
16.21	Manejo do sistema de irrigação	319
16.22	Irrigação com turno de rega prefixado	321
16.23	Irrigação com turno de rega variável	321
16.24	Considerações finais	323
	Referências	324

CAPÍTULO 17

17	Eficiência de uso da água na agricultura irrigada	327
	<i>Durval Dourado Neto, Allan Delfino, Pedro Alves Quilici Coutinho, Rodnei Rizzo, Marcela Almeida de Araujo, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto, Pedro Abel Vieira Júnior, Roberto Rodrigues e Alysson Paolinelli</i>	
	Resumo	327
17.1	Introdução	327
17.2	Índice de desenvolvimento rural sustentável	329
17.3	Estudo de caso: o desenvolvimento rural sustentável no estado de São Paulo	338
17.4	Índice de desenvolvimento rural sustentável	346
17.5	Considerações finais	347
	Referências	347

CAPÍTULO 18

18	Fertirrigação: aspectos relevantes e viabilidade técnica x financeira	351
	<i>Luiz Fabiano Palaretti e Alexandre Barcellos Dalri</i>	
	Resumo	351
18.1	Introdução	351
18.2	Premissas da fertirrigação	352
18.3	Quantidade e qualidade da fonte hídrica	355
18.4	Sistema de injeção de fertilizantes	356
18.5	Injeção direta na sucção da bomba	357
18.6	Injeção feita por tanques de diferencial de pressão	358
18.7	Injeção por Venturi	358
18.8	Injeção via bomba centrífuga	359
18.9	Injeção via bomba injetora	360
18.10	Injetora de motor hidráulico – Bombas dosadoras	361
18.11	Injetora multicanais	362
18.12	Considerações sobre o uso de fertilizantes em sistemas fertirrigados	363
18.13	Rotina básica no sistema operacional de fertirrigação	365
18.14	Manejo da fertirrigação via extrator de solução	366
18.15	Custos operacionais: adubação manual x fertirrigação	367
18.16	Considerações finais	370
	Referências	371

Parte II - CULTURA

CAPÍTULO 19

19	Irrigação de pastagens	375
	<i>Luís César Dias Drumond, Fernando Campos Mendonça, André Santana Andrade, Maicon Fábio Appelt e Danielle Morais Amorim</i>	
	Resumo	375
19.1	Introdução	375
19.2	Princípios básicos de irrigação e fertirrigação de pastagem	376
19.3	Potencial produtivo de pastagens fertirrigadas	378
19.4	Sistemas de irrigação mais utilizados em pastagem	384
19.5	Irrigação por aspersão	385
19.6	Fertirrigação e uso racional de efluentes em pastagens	390
19.7	Produção intensiva de volumoso para confinamento	392
19.8	Manejo racional da irrigação de pastagens	395
19.9	Perspectivas e tendências futuras de irrigação de pastagem	397
19.10	Considerações finais	398
	Referências	398

CAPÍTULO 20		
20	Irrigação do cafeeiro	403
	<i>André Luís Teixeira Fernandes e Eusímio Felisbino Fraga Júnior</i>	
	Resumo	403
20.1	Introdução	403
20.2	Cafeicultura irrigada	404
20.3	Investimentos na irrigação do cafeeiro	405
20.4	Sistemas de irrigação para o cafeeiro	409
20.5	Gerenciamento e manejo da irrigação	412
20.6	Fertirrigação do cafeeiro	418
20.7	Considerações finais	419
	Referências	420

CAPÍTULO 21		
21	Irrigação de fruteiras tropicais (abacaxizeiro, bananeira, mamoeiro e mangueira)	429
	<i>Eugênio Ferreira Coelho, Dionei Lima Santos e Welson Lima Simões</i>	
	Resumo	429
21.1	Introdução	429
21.2	Irrigação do abacaxizeiro (<i>Ananas comosus</i>)	431
21.3	Irrigação da bananeira (<i>Musa spp.</i>)	437
21.4	Irrigação do mamoeiro (<i>Carica papaya</i>)	444
21.5	Irrigação da mangueira (<i>Mangifera indica L.</i>)	449
21.6	Considerações finais	453
	Referências	454

CAPÍTULO 22		
22	Irrigação de fruteiras subtropicais (citricultura e videira)	461
	<i>Regina Célia de Matos Pires, Marco Antônio Fonseca Conceição, Maurício Antônio Coelho Filho</i>	
	Resumo	461
22.1	Introdução	461
22.2	Citricultura	462
22.3	Viticultura	466
22.4	Considerações finais	470
	Referências	471

CAPÍTULO 23

23	Manejo da irrigação em plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares	499
	<i>Patricia Angélica Alves Marques e Catariny Cabral Aleman</i>	
	Resumo	499
23.1	Introdução	499
23.2	Recursos hídricos frente a produção de planta medicinal, aromática e condimentar	500
23.3	Manejo de irrigação de plantas medicinais de importância econômica	501
23.4	Considerações finais	508
	Referências	509

CAPÍTULO 24

24	Irrigação para gramados e paisagismo no Brasil	515
	<i>Jose Giacoia Neto</i>	
	Resumo	515
24.1	Introdução	515
24.2	História da irrigação para paisagismo e gramados esportivos	516
24.3	Emissores de água	518
24.4	Válvulas e estações	534
24.5	Automação	536
24.6	Considerações finais	538
	Referências	538

CAPÍTULO 25

25	Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: história, mitos e desafios	539
	<i>Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira</i>	
	Resumo	539
25.1	Introdução	539
25.2	Alinhando conceitos	540
25.3	Transição tecnológica e geográfica para produção irrigada	541
25.4	Crises hídrica e econômica	543
25.5	Sistema irrigado de produção: a nova realidade do setor	544
25.6	Considerações finais	555
	Referências	556

CAPÍTULO 26

26	Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva	563
	<i>Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira</i>	
	Resumo	563
26.1	Introdução	564
26.2	Tipos de sistema de irrigação para cana-de-açúcar	564
26.3	Demanda hídrica e de irrigação	567
26.4	Manejo da irrigação	569
26.5	Parâmetros para estimativa de demanda hídrica	572
26.6	Estratégias de manejo	576
26.7	Estratégia de maturação (drying-off)	577
26.8	Recomendações para estimar a demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado	579
26.9	Resposta produtiva da cana-de-açúcar ao sistema irrigado	581
26.10	Plano de investimentos em produção irrigada	585
26.11	Viabilidade econômica	586
26.12	Considerações finais	588
	Referências	588

POSFÁCIO	593
-----------------	------------

HOMENAGEM (Salassier Bernardo - Irrigação)	595
---	------------

Relação de autores, capítulos e e-mails	597
--	------------

Parte I

TÉCNICA

Parte I - TÉCNICA

CAPÍTULO 1**1 A REVOLUÇÃO AZUL NO CONTEXTO DA AGRICULTURA IRRIGADA***Rubens Duarte Coelho***Resumo**

O século XXI inicia-se sob o estigma do aquecimento global e da escassez de água em diversas partes do globo terrestre. O crescimento urbano e as demandas industriais já competem atualmente com a água disponível para a agricultura irrigada e a perspectiva futura é de acirramento desta disputa, além do mais, preservar rios e áreas de proteção permanente (APP), exigem manter fluxos de água nas microbacias em níveis mínimos. Conseguiremos conciliar todos esses interesses? A agricultura moderna está adentrando uma nova era tecnológica a era da Revolução Azul na Agricultura, diferentemente da Revolução Verde na Agricultura que focou no aumento de produtividade das culturas agrícolas por unidade de área, essa nova revolução está focada no aumento de produtividade das culturas por unidade de água requerida pelas culturas (evapotranspiração). O texto leva o leitor por uma rápida passagem pela história do desenvolvimento da irrigação no mundo, adentrando vários detalhes da eficiência do uso da água na agricultura moderna, em especial às novas tecnologias de irrigação, à produção de bioenergia de segunda geração (Etanol 2G) e apresentando finalmente, o estado da arte em termos da tecnologia de Irrigação de Precisão. Espera-se com esta abordagem múltipla, despertar o interesse das novas gerações para a importância da água na sustentabilidade agrícola, pois sabe-se atualmente que a produção de alimentos no futuro não será limitada pela disponibilidade de terras no mundo, como se acreditava no passado, mas sim pela disponibilidade hídrica nas microbacias de produção agrícola.

1.1 Introdução

As civilizações antigas da humanidade precisavam garantir a produção de alimentos nos locais onde viviam, pois não havia comércio internacional de produtos agrícolas que oferecesse segurança alimentar à população em anos de chuvas escassas; deste modo, desenvolveram técnicas avançadas de irrigação em seus domínios territoriais, visando garantir o abastecimento de alimentos em situações adversas de precipitação natural.

A irrigação foi a primeira tecnologia empregada na agricultura das grandes civilizações, precedendo de longa data, o melhoramento genético, os maquinários, os adubos sólidos e os defensivos agrícolas (herbicidas, fungicidas e inseticidas).

1.2 A Irrigação no mundo antigo

O início da agricultura irrigada se deu em torno do ano 4000 a.C., quando alguns agricultores do norte da Mesopotâmia migraram para a região sul desta planície entre os rios Tigres e Eufrates, denominada "Fértil Crescente" (Iraque). Diferentemente da região norte, as chuvas da região sul eram bem mais escassas e irregulares (PONTING, 1991).

Uma particularidade desta região sul da Mesopotâmia é que os rios transportam quantidades significativas de sedimentos, o que proporciona um grande acúmulo de material sólido em suas margens, criando verdadeiros diques naturais ao longo dos rios, de modo que muitas vezes a superfície da água destes rios encontra-se em uma cota mais elevada do que as terras das várzeas, nessas condições, para se fazer uma agricultura irrigada não é preciso bombear água (tecnologia não disponível na época), apenas conduzi-la por gravidade até o local desejado, através de uma rede de canais e reservatórios de água encravados nestes diques naturais. Esta mesma condição de dique natural ocorre nos rios da Índia e da China, formados a partir do degelo da neve na cordilheira do Himalaia e na cadeia de montanhas *Bayan Har* respectivamente.

A irrigação transformou estas sociedades como nunca antes imaginado. Pela primeira vez os agricultores foram capazes de produzir uma quantidade de alimento superior ao plantio de sequeiro, de tal modo que parte da sociedade não precisava se dedicar à agricultura e pudessem desenvolver outras ocupações profissionais (exército, tecelagem, cerâmica, metalurgia, escrita, arquitetura e matemática).

As sociedades que mais se destacaram na agricultura irrigada foram: Sumérios, Babilônios e Assírios (Rios Tigres e Eufrates), Egípcios (Rio Nilo), Indus (Paquistão e Índia), Chineses (Yellow River), Astecas e Maias (América Central e Peru).

Os Sumérios formaram a sociedade mais notável da época, além da agricultura irrigada inventaram a roda e também a primeira escrita da humanidade (cuneiforme); viviam distribuídos no "Fértil Crescente" em 8 cidades, com aproximadamente 20 mil habitantes cada uma. O desaparecimento abrupto desta civilização em torno do ano 2000 a.C., foi sempre uma das grandes incógnitas da arqueologia moderna, mostrando a vulnerabilidade deste modelo de crescimento social com base na agricultura irrigada (WEISS, 1993). Os egípcios, os Indus e os chineses são as únicas civilizações remanescentes deste período histórico da humanidade.

Somente no final do século XX, uma equipe de cientistas composta por arqueólogos, físicos de solos e geólogos conseguiu decifrar o enigma do desaparecimento da civilização Suméria, com base em técnicas arqueológicas modernas (WILFORD, 1993).

Análises detalhadas de diversos perfis de solo estratificados nas planícies do "Crescente Fértil" e na região norte da Mesopotâmia, revelou que houve um considerável acúmulo de sais nessas terras agrícolas (salinização do solo), acompanhado de uma significativa alteração climática, que diminui as precipitações naturais na região por aproximadamente 300 anos. A baixa atividade microbiológica do solo, em especial de minhocas e insetos, associada a quantidades expressivas de areias finas típicas de dunas (ventos fortes), comprovaram a intensificação da aridez e a dissecação da paisagem nesta região durante este período. Exatamente o que causou esta mudança climática permanece desconhecido até o momento, porém esta descoberta ajudou a esclarecer o colapso desta sociedade.

O Rio Nilo não apresentava esta formação de diques naturais ao longo de suas margens, era preciso que os egípcios esperassem o período chuvoso do ano para que o rio extravasasse nas planícies, de modo a permitir o plantio das sementes, no momento mais adequado de umidade e aeração no solo. A agricultura irrigada egípcia não era efetuada continuamente durante o ano; era temporária durante um curto período de umidade ideal no solo, após o período de cheia do rio. Somente entre os anos de 1920 e 1940, com a construção de diversas barragens ao longo do Rio Nilo é que os Egípcios conseguiram ter controle sobre o nível das águas deste rio, de modo que a agricultura

irrigada se tornou uma atividade contínua ao longo do ano. Os egípcios são a civilização mais longínqua e de maior sucesso na prática da agricultura irrigada (BUTZER, 1976).

1.3 A agricultura irrigada na era moderna

Os ingleses foram os responsáveis por darem início à Engenharia de Irrigação tecnificada no mundo no ano de 1840, na região de Punjab, localizada na fronteira norte entre a Índia e o Paquistão. Nesta época, a Índia era colônia inglesa e entre os anos de 1837 e 1838 ocorreu uma grande fome na região por falta de chuvas, resultando na morte de milhões de pessoas (STONE, 1984).

Engenheiros ingleses que haviam aprimorado suas habilidades técnicas com a construção de estradas de ferro e de canais na Europa, se lançaram à nobre tarefa de desenvolver sistemas de irrigação por superfície nesta região da Índia conhecida como a "Terra dos Cinco Rios", visando evitar novas catástrofes humanitárias.

Em 1857 foi inaugurado o Canal de Ganges (Punjab), que iria permitir controlar com bastante precisão os níveis de água nos rios e nos reservatórios na região, de maneira que a permitir o fluxo por gravidade da água até as parcelas irrigadas no campo.

O dimensionamento deste canal baseou-se em uma formulação francesa, nunca antes testada nesta escala de grandeza. A declividade do canal ficou superdimensionada e a velocidade de fluxo inadequada ao solo da região, o que começou a erodir as margens do canal, de tal sorte, que foi necessário a readequação desta declividade, algo bastante trabalhoso e custoso para a coroa Inglesa. No ano de 1900 a Índia já contabilizava uma área total irrigada de 13,4 milhões de ha, mais do que o dobro da área atual (2020) irrigada no Brasil: 6,5 milhões ha.

Nos Estados Unidos, o início da engenharia de irrigação na era moderna se deu em torno de 1850 com os mórmons no estado de Utah, a maioria descendentes de imigrantes ingleses. Anteriormente a este período, a irrigação era uma atividade artesanal praticada apenas por povos indígenas na fronteira com o México. Posteriormente, o estado da Califórnia baseando-se na experiência bem sucedida de Utah, iniciou também a implantação da irrigação em seus domínios territoriais, sendo que em 1900 já possuía 400 mil ha implantados, enquanto que os mórmons na mesma época totalizavam 100 mil ha irrigados em Utah (MORGAN, 1993; WORSTER, 1985).

A engenharia de irrigação no Brasil iniciou suas atividades em 1904 no município de Pelotas no Rio Grande do Sul, com a implantação da primeira lavoura empresarial de arroz irrigado por inundação (www.arrozcristal.com.br). O potencial de área irrigada no Brasil é estimado em 66 milhões de ha (SPAVOREK *et al.*, 2014), sendo que atualmente contabiliza-se em torno de 6,5 milhões de ha implantados nas culturas de grãos, fruticultura, hortaliças, café e cana-de-açúcar.

O Brasil explora atualmente 10% de seu potencial total de área irrigada. A intensificação da irrigação em território nacional ocorreu a partir do ano de 1970, bem mais tardiamente quando comparado aos demais países irrigantes no mundo. Por outro lado, o Brasil utiliza equipamentos de irrigação de última geração e projetos mais tecnificados, aproveitando-se de toda a experiência acumulada nos países desenvolvidos, o que é uma grande vantagem competitiva, pois permite ser mais eficiente no uso da água com base em uma agricultura irrigada mais moderna e assertiva.

1.4 A revolução verde na agricultura

A Revolução Verde na agricultura ocorrida na última metade do século XX, promoveu um aumento significativo da produtividade da terra ($t\ ha^{-1}$) nas regiões agrícolas mais antigas do globo terrestre (Europa e Ásia); já nas regiões agrícolas mais jovens (América do Norte, América do Sul e Oceania) este aumento de produtividade da terra se deu simultaneamente à expansão das áreas cultivadas.

O tripé de sustentação da Revolução Verde baseou-se em três premissas básicas: (i) o melhoramento genético que proporcionou variedades com potencial de alta produtividade, (ii) o uso intensivo de produtos químicos (adubos, herbicidas, inseticidas) e (iii) a implantação da tecnologia de irrigação em larga escala. Sem o uso de fertilizantes e defensivos, as novas sementes não poderiam expressar seu potencial genético; sem água suficiente, os fertilizantes teriam pouco efeito (POSTEL, 1999).

Embora a Revolução Verde tenha ajudado na preservação ambiental, evitando que áreas de florestas e de pastagens fossem transformadas em áreas agrícolas, ela demandou imensas quantidades de água. O aumento de 2,4 vezes na produtividade das terras agrícolas entre os anos de 1950 e 1995 foi acompanhado pelo aumento de 2,2 vezes na quantidade de água utilizada na irrigação (SHIKLOMANOV, 1996).

O século XXI inicia-se sob o estigma do Aquecimento Global e tem-se observado a ocorrência de secas intensas imprevisíveis em diversas partes do globo terrestre (sistema Cantareira [SP], Califórnia, Austrália, Índia, Kenya, África do Sul, etc.). O crescimento urbano e as demandas industriais estarão competindo com a água disponível para a agricultura nas próximas décadas, além do mais, restaurar populações de peixes, salvar espécies ameaçadas de extinção, preservar rios e áreas de proteção permanente (APP), exigirão manter fluxos de água nas microbacias em níveis mínimos. Conseguiremos conciliar todos esses interesses?

1.5 A revolução azul e a pegada hídrica na agricultura

Agora que os recursos hídricos estão se tornando visivelmente mais escassos, aumentar a eficiência do uso água na agricultura (*more crop per drop*) é uma questão chave para atender às demandas atuais e futuras por alimentos, fibras e bioenergia da humanidade. A agricultura moderna está adentrando uma nova era tecnológica a era da Revolução Azul.

A Revolução Azul será bem mais difícil de ser implementada nos próximos anos quando comparada à Revolução Verde, pois a água desempenha diversas funções ambientais, sendo que o uso da água em um determinado ponto de uma bacia hidrográfica, pode ocasionar impactos em outros locais. A Revolução Azul requer estratégias de planejamento mais criativas e mais diversas que resultarão em uma agricultura mais intensiva em informação e menos intensiva em insumos, promovendo a introdução de novas tecnologias e um melhor gerenciamento da água na agricultura (POSTEL, 1999).

O termo "eficiência do uso da água" foi definido inicialmente por fisiologistas vegetais para expressar a quantidade de matéria seca (MS) produzida por uma planta em função da quantidade de água evapotranspirada ($kg_{MS}/m^3_{H_2O}$); embora este termo seja usual na literatura científica, do ponto de vista da engenharia, a eficiência de um processo é um valor percentual adimensional. Para resolver este impasse foi proposto a utilização do termo "produtividade da água" como sinônimo do termo "eficiência do uso da água" (STEDUTO; HISAO; FERERES, 2007).

O comércio internacional de *commodities* agrícolas intensivas no uso de água, tem gerado a percepção de que os recursos hídricos não estão mais vinculados a determinados domínios territoriais no mundo. Desta maneira a origem dos recursos hídricos está desconectada da distribuição espacial dos consumidores finais (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

Observa-se na Figura 1, que a América do Norte, a América do Sul e a Oceania são os grandes centros exportadores de água virtual no mundo, sendo que a Europa e a Ásia são os maiores importadores deste tipo de água, com base no comércio internacional de *commodities* agrícolas.

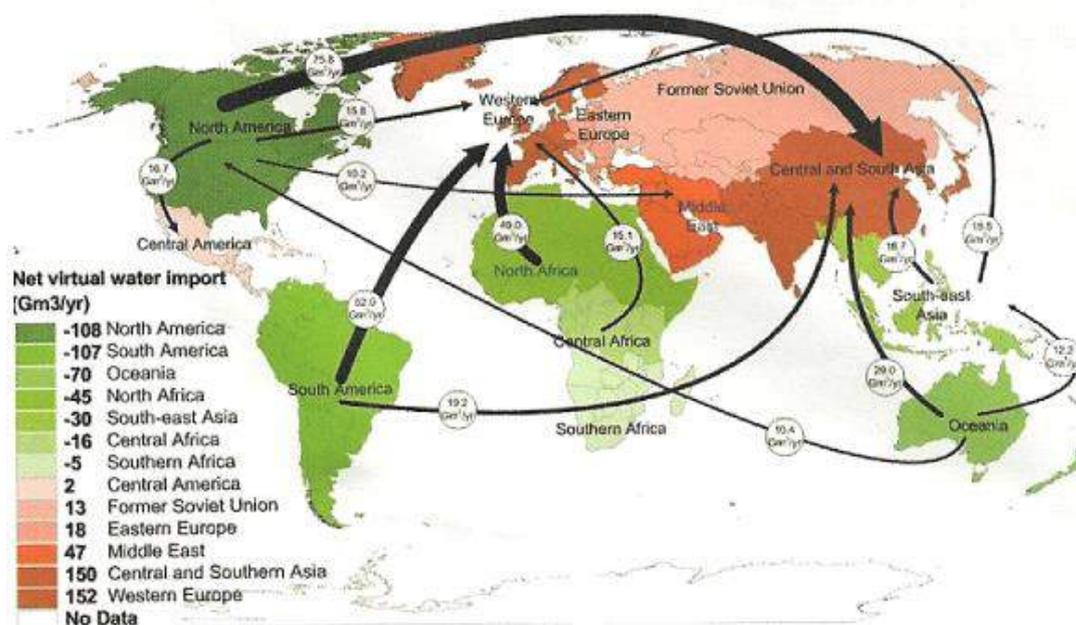


Figura 1. Saldo de importação de água virtual em diferentes regiões do globo (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

A ideia de se analisar o uso da água ao longo da cadeia de suprimento de um produto agrícola, ganhou notoriedade mundial com a introdução do conceito "*water footprint*" apresentado por Hoekstra em 2003, que leva em consideração tanto o uso direto quanto o uso indireto de água na produção de um bem de consumo. A pegada hídrica é um indicador multidimensional georeferenciado que quantifica o volume consumido por tipo de fonte hídrica e o volume equivalente para mitigar a "poluição" do processo de produção; ela não é uma medida do impacto ambiental ocasionado pelo consumo de água e da poluição gerada em um determinado ecossistema.

A pegada hídrica é subdividida nas cores azul, verde e cinza. A pegada hídrica azul refere-se à água retirada dos rios e dos lagos normalmente utilizada em sistemas de irrigação. A pegada hídrica verde, refere-se à água da chuva que fica disponível no perfil de solo e que é absorvida pelo sistema radicular das plantas. A pegada hídrica cinza, refere-se ao volume de água virtual equivalente, necessário para "diluir" a poluição gerada no processo.

Na Figura 2, observa-se um exemplo de quantificação da pegada hídrica na cultura de cana-de-açúcar para vários países do mundo (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA, 2012). O Brasil tem uma eficiência do uso da água muito superior à maioria dos países produtores de cana-de-açúcar. Cuba, Vietnã e Índia apresentam valores bem elevados de pegada hídrica. Destaques para Paquistão e Egito, que apresentam elevados níveis

de irrigação (água azul). Austrália, Colômbia, Argentina e Peru são também bem eficientes no uso da água na produção de cana-de-açúcar.

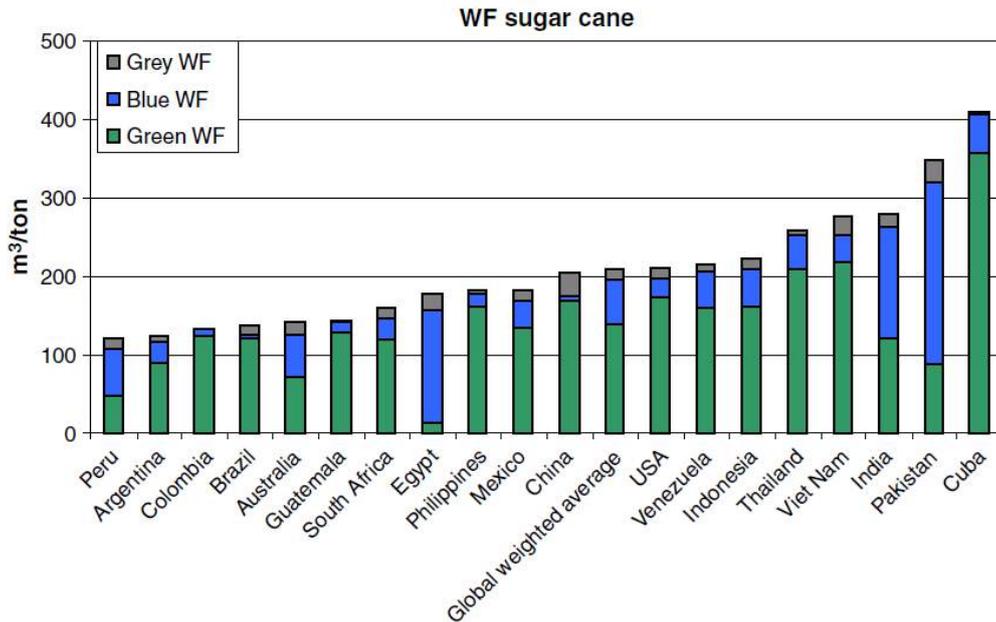


Figura 2. Pegada hídrica verde, azul e cinza na produção de cana-de-açúcar, para diferentes países no mundo (m³ de água por tonelada de colmos frescos) (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA, 2012).

Embora a agricultura irrigada represente aproximadamente 70 % do consumo hídrico mundial, não se sabe ao certo qual a eficiência de aplicação desta água na zona radicular das plantas. Estima-se que as perdas por evaporação no processo de aplicação de água na irrigação possam ser na ordem de 10 a 20 % e as perdas por drenagem de 15 a 20 %, resultando em uma perda total entre 25 a 40 % da água aplicada nas irrigações por aspersão e por superfície. Esta "ineficiência" da irrigação mundial pode ser considerada uma "grande oportunidade", pois com o uso de novas tecnologias, ao aumentar o nível dessa eficiência, mais água estará disponível para ampliação da agricultura irrigada.

1.6 O sistema híbrido de irrigação: pivô central e gotejamento

Existem poucos exemplos de países, bacias hidrográficas e perímetros irrigados que tenham promovido ganhos significativos da produtividade da água em larga escala na agricultura. Israel é o único país que já realizou o que o mundo precisa fazer nos próximos 30 - 40 anos, ou seja: dobrar a produtividade da água na agricultura na escala de uma nação. O feito israelense se deu nas culturas de hortaliças, frutas e culturas de maior valor agregado (BHATIA; CESTTI; WINPENNY, 1995).

A estratégia israelense de aumento da eficiência do uso da água na agricultura irrigada, baseou-se em duas premissas básicas: (i) no uso da irrigação localizada por gotejamento em larga escala, visando diminuir o desperdício de água por evaporação no momento da aplicação pelos sistemas de irrigação, evitando a retenção foliar da água no dossel das plantas e reduzindo as perdas de água por evaporação direta do solo e (ii) na implantação de um sistema de informação para o manejo de precisão da irrigação nas culturas irrigadas, com base em estações meteorológicas, sensores de umidade do solo e sensoriamento remoto, evitando aplicações excessivas de água e a ocorrência de deficiência hídrica em momentos críticos das culturas (HILLEL, 1994).

A implantação da irrigação localizada em grandes áreas, tem como desafio tecnológico o monitoramento e o controle do entupimento dos emissores, de maneira tal que a vida útil prevista em projeto seja assegurada durante a operação de campo. Existem exemplos de sucesso na superação deste desafio tecnológico, com base na seleção criteriosa dos emissores, dos sistemas de filtragem, tanques de aeração/decantação e da implantação de procedimentos de manutenção periódica: abertura dos finais de linha, aplicação de cloração e ácidos na água de irrigação.

Em regiões úmidas onde se pratica a irrigação suplementar, a previsão de chuvas com maior precisão poderá evitar irrigações desnecessárias e otimizar a captura das precipitações naturais no perfil de solo das áreas irrigadas.

Atender ao desafio de dobrar a produtividade da água nas culturas de trigo, milho, soja, algodão e arroz demandará o uso intensivo de novas tecnologias e estratégias; embora nenhuma nação tenha conseguido este feito até o momento, a região noroeste do Texas nos Estados Unidos pode servir como inspiração para esta causa.

O declínio do aquífero Ogallala forçou os agricultores texanos à adotarem uma irrigação mais eficiente nos equipamentos do tipo pivô central previamente instalados nesta região, substituindo os tradicionais bocais de aspersão, por emissores do tipo LEPA (COELHO *et al.*, 1996), posicionados em pendurais próximos ao solo, de maneira tal, que a água não fica retida no dossel das plantas, o que promove uma economia de água entre 15 e 30% e resulta em ganhos de produtividade agrícola na ordem de 10 a 15% (algodão e milho).

A irrigação por pivô central foi apresentada aos agricultores em 1948 e patenteada nos Estados Unidos em 1952, já a irrigação por gotejamento em Israel surgiu em 1965. Entre os anos de 1950 e 2015, houve um grande aperfeiçoamento destas duas tecnologias de irrigação, tanto a nível de engenharia de produto, quanto a nível de engenharia de material. Os equipamentos evoluíram para níveis de confiabilidade muito elevados, porém dois problemas persistem até os dias de hoje: no pivô central as perdas de água por evaporação, deriva e retenção foliar, enquanto que na irrigação por gotejamento a questão do entupimento dos gotejadores, principalmente com a tendência de diminuição da vazão dos emissores para valores entre 0,4 e 1,0 L h⁻¹, visando otimizar a malha hidráulica no campo; várias tecnologias de emissores para pivô e gotejamento foram desenvolvidas nas últimas décadas, de modo que estes problemas foram amenizados, porém não eliminados completamente até a presente data.

Mais recentemente, a proposta de um sistema híbrido de irrigação, resultante da fusão dos sistemas de irrigação pivô central e gotejamento fixo, deu origem à um novo conceito em sistemas de irrigação denominado de "gotejamento móvel por pivô central" (PMDI /*Pivot Mobile Drip Irrigation*). Este sistema híbrido propicia ao sistema pivô central irrigar o solo sem molhar a folhagem da cultura, utilizando tubo-gotejadores como emissores de água, que são arrastados sobre o solo ou dossel das plantas, conectados diretamente à tubulação aérea do pivô central (KISEKKA *et al.*, 2015); nestas condições as perdas de água por evaporação, deriva e retenção foliar são minimizadas.

A irrigação por gotejamento móvel utiliza gotejadores de alta vazão, entre 8 e 12 L h⁻¹, sendo eles bem menos susceptíveis ao entupimento (causas físicas, químicas ou biológicas), associado ao fato de utilizar uma quantidade de tubogotejadores bem menor na área, apenas 2 % do total de metros lineares de plantio, quando comparado ao sistema de irrigação por gotejamento fixo, o que viabiliza economicamente,

reposições mais frequentes de tubulações, para manter a operacionalidade do sistema, em casos de entupimentos recorrentes e mais intensivos.

O sistema híbrido PMDI (Figura 3) é um sistema atrativo, pois une a eficiência da irrigação por gotejamento, com a praticidade da irrigação por pivô central, a um custo mais acessível por unidade de área irrigada. A utilização de sistemas de filtragem da água na base do pivô central é obrigatória no PMDI (*mesh* 80), para garantir a longevidade dos emissores tipo gotejador.

Irrigantes de cultivos intensivos (batata e tomate industrial) possuem uma certa preocupação fitossanitária com relação aos tubos gotejadores sendo arrastados sobre o dossel das plantas, no que diz respeito à possibilidade de dispersão de doenças e pragas na área irrigada. Aplicações de campo na África do Sul (2020), conduzidos pela empresa americana *DragonLine*, têm-se mostrado insensível a estes problemas fitossanitários nos cultivos intensivos de batata, tomate, cebola e cana-de-açúcar (Figura 4). Tecnologias futuras de revestimento destes tubos gotejadores com nanomateriais de cobre ou prata, poderão proporcionar maior segurança fitossanitária aos irrigantes optantes pelo PMDI.

Nos Estados Unidos o uso do PMDI concentra-se basicamente nas culturas de milho, soja e trigo, já no Brasil, vislumbra-se o potencial desta tecnologia na irrigação da cana-de-açúcar e na aplicação de vinhaça, evitando a famigerada corrosão dos equipamentos de aspersão nas usinas de etanol.

Trabalho pioneiro no desenvolvimento de um software livre para o dimensionamento hidráulico do sistema de irrigação por gotejamento móvel em pivô central (PMDI) foi apresentado recentemente na Esalq/USP (ALMEIDA *et al.*, 2017). Atualmente encontra-se em andamento um outro projeto de pesquisa FAPESP (2018/09729-7), coordenado pelo autor deste capítulo, que enfoca a questão do entupimento dos tubo gotejadores arrastados sobre a superfície do solo na fase inicial de cultivo, pela possibilidade de obstrução dos gotejadores, por aglomeração de partículas sólidas de fora para dentro nos orifícios dos tubo gotejadores, decorrentes da movimentação do equipamento na área; resultados iniciais demonstram a robustez do sistema em resistir ao entupimento pelo arraste sobre o terreno, para os diferentes tipos de solos estudados.

Ressalta-se que o sistema PMDI mantém o sistema de aspersão original do pivô central instalado, de tal modo, que ambos os sistemas possam ser acionados alternadamente, de acordo com as necessidades do manejo de irrigação, ao longo do ciclo de cultivo.

A irrigação por pivô central por imposição nas questões de outorga, deverá ser direcionada no futuro para as modalidades PMDI (*Pivot Mobile Drip Irrigation*) e LEPA (*Low Energy Precision Application*), unindo as vantagens de ambas tecnologias de irrigação em um único equipamento: elevada eficiência na aplicação de água, menor custo de implantação, maior resistência ao entupimento e elevado nível de automação.

Por ocasião do X Congresso Brasileiro de Tomate Industrial (2020), no painel intitulado "O Manejo Inteligente da Irrigação na Cultura do Tomate Industrial", o sistema PMDI foi apresentado pela primeira vez aos agricultores brasileiros, sendo que em breve, espera-se que o sistema seja instalado em campo, para que seja avaliado potencial desta tecnologia em condições nacionais de cultivos irrigados.

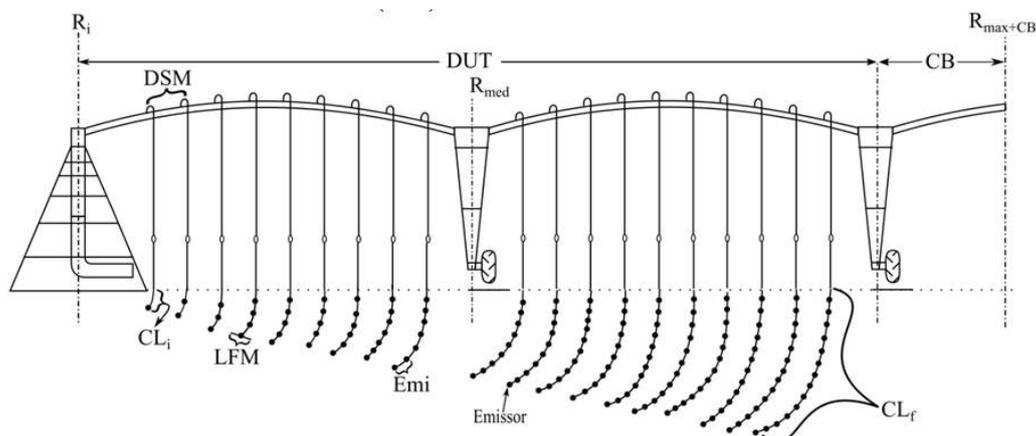


Figura 3. Esquema de um sistema de irrigação por gotejamento móvel em pivô central (*PMDI - Pivot Mobile Drip Irrigation*). R_i - raio inicial; R_{med} - raio médio do pivô; R_{max+CB} - raio máximo do pivô com balanço; DUT - Distância até a última torre; CB - comprimento do balanço; DSM - Distância entre saídas de mangueira; CL_i - comprimento de tubo gotejador da primeira linha; CL_f - comprimento de tubo gotejador da última linha; LFM - largura da faixa molhada do emissor; E_{mi} - espaçamento entre emissores no tubo gotejador (ALMEIDA *et al.*, 2017).



Figura 4. Imagens da irrigação por gotejamento móvel na cultura do tomate industrial (Cortesia: Empresa *Dragonline / Monty Teeter*).

1.7 A eficiência do uso da água na agricultura

O segundo conjunto de estratégias visando aumentar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada, baseia-se em promover a habilidade própria das plantas em serem mais eficientes no processo de fotossíntese. O crescimento das plantas está diretamente relacionado com a taxa de transpiração, que é o processo de absorver a água do solo e liberá-la de volta para a atmosfera.

Trabalhando com uma grande variedade de culturas em diversas localidades, vários pesquisadores têm relatado existir uma relação linear entre a transpiração das

plantas e a produção de biomassa, até o ponto em que a água não é mais o fator limitante. Isto significa que para uma determinada cultura em particular, em uma certa localidade, uma maior produção de biomassa requer um maior consumo de água pelas plantas. Observa-se que essa linearidade é observada apenas para a “transpiração” das plantas e não para a “evapotranspiração” das plantas.

Com base nos experimentos que o autor tem conduzido na Esalq/USP, relacionados ao consumo hídrico de diferentes variedades de cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento, comprovou-se essa linearidade de resposta entre a produtividade de colmos e a transpiração da cana-de-açúcar (COELHO *et al.*, 2019). Nota-se também, que o melhoramento genético desta cultura nas últimas décadas, promoveu uma maior eficiência no uso da água com base no aumento do índice de colheita (kg açúcar / kg biomassa total produzida). Observou-se que o melhoramento genético alterou significativamente o nível transpiração das plantas, de maneira tal, que diferentes variedades apresentam diferentes volumes de água transpirados por unidade de área, o que resulta em diferentes quantidades de biomassa produzida por unidade de área num mesmo ambiente de produção. Por outro lado, o consumo hídrico transpirado por unidade de matéria seca produzida pelas diferentes variedades de cana-de-açúcar é praticamente constante para uma mesma condição climática, algo intrínseco ao processo de fotossíntese e do *deficit* de pressão de vapor da atmosfera no local considerado.

1.8 Fotossíntese: plantas C₃ e C₄

As plantas precisam abrir os estômatos para capturar o CO₂ da atmosfera cujo carbono é a matéria prima principal da biomassa vegetal (42% base peso seco), durante este processo, perde água para a atmosfera através da transpiração, o que promove o resfriamento das folhas (calor latente de vaporização), mantendo a temperatura celular em níveis adequados para a fotossíntese.

A eficiência do uso da água em termos de matéria seca produzida é diferente entre as plantas de ciclos C₃ e C₄ de fotossíntese. As plantas do ciclo C₃ são menos eficientes no uso da água no processo fotossintético do que as plantas C₄. Em um mesmo ambiente agrícola, as plantas C₃ mantem a condutância estomática em nível mais elevado e por maior tempo, para conseguirem sintetizar uma mesma unidade de biomassa que uma planta C₄, desta maneira transpiram mais água para a atmosfera. As plantas C₄ possuem propriedades especiais anatômicas e bioquímicas que as tornam mais eficientes no uso da água, quando comparadas às plantas C₃, por serem mais rápidas e por realizarem fotossíntese com níveis de CO₂ inferiores no mesófilo foliar, requerendo um menor tempo e uma menor intensidade de abertura dos estômatos para o ambiente.

As variedades de cana-de-açúcar que através de uma menor transpiração “pouparam a água do solo” são normalmente mais resistentes aos períodos de estresse hídrico, pois adotam a tática de evitar o estresse hídrico e não de resistir ao estresse hídrico, já as variedades de cana que apresentam um enraizamento mais profundo no solo, proporcionam uma maior disponibilidade de água verde para as plantas (CAD), diminuindo a necessidade de irrigação.

No decorrer da Revolução Verde os índices de colheita (biomassa de interesse comercial por biomassa total aérea produzida) das culturas de arroz, trigo e milho passaram de valores iniciais de 30 % para valores atuais entre 40 e 60 % (MANN, 1999). Este incremento no índice de colheita aumentou consideravelmente a produtividade da terra e simultaneamente a produtividade da água (eficiência do uso da água).

Fisiologistas vegetais estudam a vários anos, a possibilidade de fazerem com que as plantas controlem o fechamento estomático de maneira mais precisa, pois algumas vezes os estômatos são mantidos abertos por um período mais prolongado do que o necessário para a captura do CO₂ atmosférico essencial à fotossíntese, o que faz com que a planta perca água para o ambiente sem nenhum ganho de biomassa. Fazendo com que os estômatos se fechem mais rapidamente, a transpiração da planta seria reduzida sem nenhum prejuízo à produtividade. Esta tecnologia baseia-se na aplicação de agentes antitranspirantes (ex. ácido abscísico); até o presente momento, o uso desta tecnologia ainda não é viável do ponto de vista operacional e econômico.

Outros pesquisadores depositam suas esperanças em aumentar a eficiência bioquímica do processo fotossintético; este desafio é enorme, visto que os processos de fotossíntese como se conhecem hoje, permanecem essencialmente inalterados por milhões de anos. Vislumbra-se inicialmente a possibilidade de manipulação da enzima Rubisco associada ao processo bioquímico fotossintético em plantas C₃, como a primeira tentativa nesta direção. Outros trabalhos nesta área, focam na aplicação de aminoácidos e compostos orgânicos vegetais tipos bioestimulantes e promotores de resistência a estresses bióticos e abióticos, assim como, na inoculação das sementes com determinados tipos de fungos, que auxiliem o sistema radicular das plantas na absorção de nutrientes e de água do solo, em condições mais extremas de disponibilidade.

1.9 Implementação da revolução azul

Será que os agricultores estarão dispostos a dedicarem tempo no aprendizado, recursos financeiros e esforços na implementação das tecnologias da Revolução Azul? Sem um ganho econômico ou benefício direto aos agricultores, a adoção destas tecnologias será lenta e restrita aos produtos agrícolas comercializados em mercados certificados mais exigentes em termos ambientais.

Nos Estados Unidos, parte significativa dos jovens demonstram pouco interesse em suceder seus pais nas atividades agrícolas das fazendas: consideram-se herdeiros, mas não sucessores. A idade média do agricultor americano atual é de aproximadamente 60 anos. A baixa atratividade em se tornar um agricultor deve-se em grande parte ao trabalho intensivo no campo, à baixa remuneração, comparado às alternativas profissionais que a vida urbana oferece e à elevada necessidade de capital para compra de terras e equipamentos. A opção por arrendar terras aos grandes conglomerados agrícolas é uma nova realidade dessa crise sucessória no campo da agricultura americana.

No Brasil, a fase áurea vivida pelo agronegócio até os dias de hoje, tem atraído diversos jovens para atuarem profissionalmente no meio rural, em função da elevada empregabilidade na área e ótimas perspectivas futuras em território nacional. Os empresários agrícolas brasileiros possuem tradição em contratarem profissionais para trabalharem em suas fazendas, cabendo a eles a função de gestores de suas propriedades e não de operadores de máquinas agrícolas como nos EUA. As alternativas profissionais fora do agronegócio que a vida urbana oferece aos jovens brasileiros, são bem menos atrativas, quando comparada às oportunidades de trabalho urbano em território americano.

Uma ferramenta estratégica da "extensão rural" para o aumento da produtividade da terra e da água é o melhoramento genético das plantas. Ao se incorporar no material genético as características (*traits*) mais propícias ao potencial de produtividade, basta o agricultor ter acesso a esta tecnologia que a transferência de conhecimento é automática, pois ela encontra-se encapsulada no material genético das

plantas. Em função desta particularidade, o melhoramento genético na agricultura apresenta um enorme potencial de mercado, sendo que diversas empresas multinacionais atuam neste segmento de negócio.

Tecnologias de manejo de irrigação que promovam uma maior eficiência na aplicação de água não podem ser incorporadas diretamente ao material genético das plantas, elas dependem da interação com o ser humano, pois são intensivas no uso de informação. Estas tecnologias são bem mais difíceis de serem implementadas a nível de campo, absorvendo esforços consideráveis dos serviços de "extensão rural" e das empresas de consultoria que exploram este segmento de mercado, o que dificulta sua implementação em larga escala, não despertando interesse comercial de empresas multinacionais de grande porte, sendo negócios explorados por pequenas e médias empresas, com faturamentos anuais bem mais modestos.

Destaca-se no Brasil, o surgimento de empresas de consultorias focadas na prestação de serviços em manejo de irrigação nos últimos 15 anos. Estas empresas atuam basicamente no manejo da irrigação por pivô central, com base em métodos climatológicos de balanço hídrico, estações meteorológicas automatizadas, coeficientes de cultura e softwares nacionais de gerenciamento da irrigação.

Observa-se um movimento destas empresas de consultoria em manejo da irrigação em incorporarem em seus protocolos técnicos de atuação, a instalação de sensores de umidade do solo nas áreas irrigada, para aferirem os coeficientes de cultivos utilizados em seus balanços hídricos, por exigência de uma maior precisão no manejo da irrigação por parte de seus clientes mais tecnificados.

Destacam-se entre os sensores de umidade do solo, os tensiômetros, as sondas TDR e as sondas de capacitância FDR. Os tensiômetros são os equipamentos mais sensíveis e confiáveis na faixa úmida do solo, entre potenciais matriciais entre -1 a -50 kPa, sendo mais indicados para a irrigação plena em áreas de irrigação por gotejamento (maior precisão em umidades do solo próximas da capacidade de campo). Por outro lado, as sondas TDR e FDR indicam com precisão potenciais matriciais no solo mais baixos, entre -33 a -100 kPa, quando calibradas adequadamente em laboratório com amostras de solo, sendo indicados para a irrigação plena e por *deficit* em sistemas de aspersão do tipo pivô central, autopropelido, convencional e no monitoramento de áreas de sequeiro.

A indústria nacional de sensores de umidade do solo tem feito progressos significativos, nos últimos 15 anos, disponibilizando equipamentos de qualidade a preços competitivos. Algumas destas empresas disponibilizam *know-how* e *know-why* mais avançados em termos de calibração de sensores capacitivos (Figura 5), laboratórios para determinação de curvas de retenção de água no solo e sistemas automáticos de aquisição de dados integrados em plataformas "cloud", de modo tal, a suprirem a demanda por serviços mais especializados em agricultura digital - IoT (*Internet of Things*).

Recentemente, um trabalho de pesquisa conduzido em Nebraska (SHARMA; IRMAK; KUKAL, 2021), analisou nove sensores de umidade do solo (sondas TDR e FDR), mostrando que a adequação dos sensores pode diferir quando diferentes métricas são empregadas. Os resultados apresentados enfatizam a necessidade de calibração e de avaliação desses sensores de umidade do solo, com base em critérios práticos e orientados para a aplicação de manejo da irrigação. A classificação da eficácia dos sensores e a incerteza associadas ao seu uso, permitiram identificar os melhores sensores para o manejo da irrigação.



Figura 5. Curva de calibração de sensor capacitivo tipo FDR, em função do sinal de saída (volts) e do potencial mátrico da água no solo via IoT/LORA (Empresa Hidrodinâmica Irrigação).

Em nível mundial observa-se o surgimento de diversas plataformas de manejo da irrigação que estão competindo com as empresas nacionais. Nos últimos 2 anos, a maioria das empresas de consultoria em manejo da irrigação, incorporaram ferramentas de sensoriamento remoto, para monitoramento destas áreas irrigadas, de modo a identificar com base em imagens de satélites, problemas de uniformidade de irrigação em equipamentos pivô central (padrões circulares) e alterações abruptas nos índices vegetativos do dossel das plantas, de modo remoto, em grandes áreas e em tempo real (inteligência artificial).

As alternativas para contribuir com a Revolução Azul no médio e no longo prazo já foram apresentadas anteriormente, porém no curto prazo, como pode-se aumentar a eficiência do uso da água na agricultura, aumentar a rentabilidade do agricultor e contribuir para a redução do efeito estufa simultaneamente?

Deve-se analisar duas tecnologias ainda não mencionadas, que são as únicas restantes a serem exploradas neste contexto: Bioenergia e Irrigação de Precisão.

1.10 O milagre azul da bioenergia

Os resíduos vegetais que ficam sobre o solo, representam em torno de 45 a 60 % da biomassa seca aérea que não é colhida nos tradicionais cultivos agrícolas. Esta biomassa que já foi produzida pelo agricultor e que já consumiu água por evapotranspiração, é deixada sobre o solo para se decompor por ação dos micro-organismos. Parte desta matéria orgânica é benéfica à fertilidade do solo, sendo que em torno de 5 - 7 t ha⁻¹ de matéria seca devem ser deixadas sobre do terreno, o restante se não colhido, será usado como "consumo de luxo" pela microbiologia do solo.

Ao se coletar do campo parte desta biomassa vegetal para fins energéticos, aumenta-se extraordinariamente o índice de colheita dos cultivos no campo (80 a 90 %), e automaticamente dá-se um salto enorme na eficiência do uso da água na agricultura, o que pode ser considerado o "milagre azul da bioenergia 2G". Na Figura 6, observa-se este aumento da produtividade da água na cultura de cana-de-açúcar (litros de etanol por m³ de água transpirada) para diferentes variedades (V₁...V₅), em função do nível de irrigação (50, 75, 75 e 100 %), para as diferentes tecnologias de produção de etanol: 1G, 2G (celulose) e 2G (hemicelulose) (SANTOS *et al.*, 2019).

A transformação da biomassa em energia pode ser feita através de diferentes tecnologias, dentre as quais se destacam: a queima direta em caldeiras, o gás metano, a hidrólise, a pirólise e a gaseificação. A queima direta da biomassa e a produção de gás metano já são bem conhecidas e utilizadas em larga escala no mundo, por outro lado a hidrólise enzimática (etanol 2G), a pirólise e a gaseificação da matéria (syngas), embora já comprovadas em escala piloto ainda estão passando pelo processo de "up scaling" industrial.

A queima direta da biomassa apresenta um rendimento termodinâmico baixo entre 12 e 18%, sendo que a gaseificação da matéria é o extremo de eficiência termodinâmica, com até 45% de rendimento, ou seja, se as usinas no Brasil tivessem acesso à tecnologia da gaseificação, poderia ser gerado 3 vezes mais bioeletricidade, com a mesma quantidade de biomassa de bagaço utilizada atualmente na queima direta. A cogeração de energia elétrica nas usinas de cana-de-açúcar do Brasil por queima direta nas caldeiras, abastece aproximadamente 10 milhões de residências no Brasil (2014).

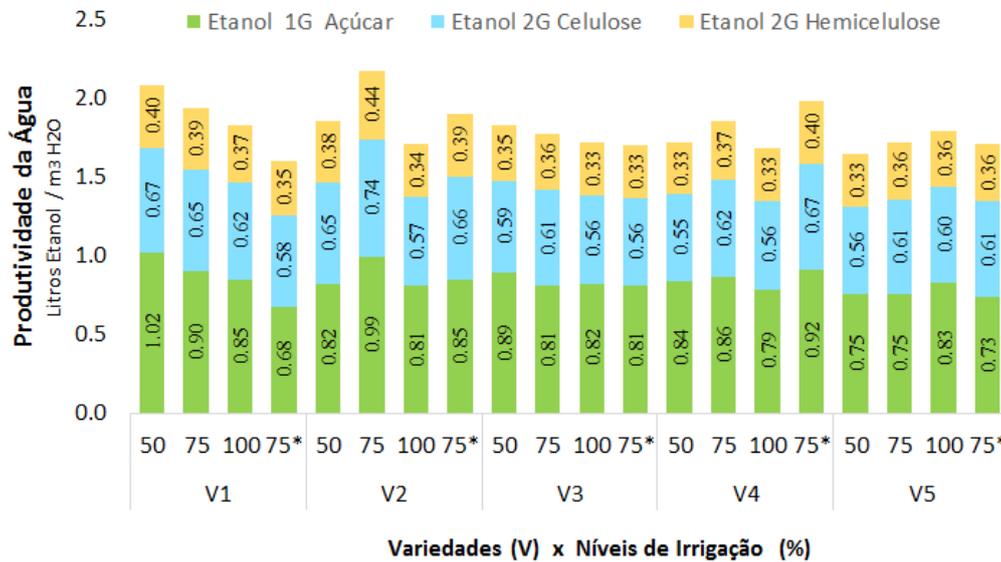


Figura 6. Produtividade da água na produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, para diferentes níveis tecnológicos (1G, 2G_C, 2G_H) em função das variedades e níveis de irrigação (SANTOS *et al.*, 2019).

O etanol 1G a partir da sacarose da cana-de-açúcar, possui barreiras alfandegárias para comercialização no mundo, pois além de beneficiar somente poucos países produtores (a cana não é plantada em países desenvolvidos de clima temperado), ele ainda gera controvérsias na competição por terra e água com a produção de alimentos. Por outro lado, o etanol 2G é amplamente aceito no mundo, sendo que a União Europeia e os Estados Unidos possuem incentivos fiscais para sua produção nacional e importação, visando o desenvolvimento desta indústria mitigadora da emissão de CO₂ a nível mundial.

Nos últimos 5 anos, o etanol de 2G começou suas operações industriais em diversos países do mundo inclusive no Brasil, com o pioneirismo das Empresas Raízen (Shell) e GranBio, que iniciaram suas operações industriais em 2014, com o apoio tecnológico da empresa dinamarquesa Novozyme.

Estima-se que possa ser recolhido entre 5 a 10 t ha⁻¹ de biomassa seca de resíduos agrícolas para ser usado na geração de bioenergia; desta maneira se atingirá em torno de 80 a 90 % do índice de colheita. Em termos monetários, calcula-se que o

valor a ser recebido pelo agricultor estará em escala mundial entre US\$ 25,00 a US\$ 60,00 por tonelada de biomassa enfardada entregue na indústria, isto representa aproximadamente US\$ 150,00 a US\$ 600,00 por hectare de renda bruta, que se descontados os custos de colheita e transporte, entre US\$ 50,00 e US\$ 150 por ha, resultará em uma renda líquida ao agricultor variando de US\$ 75,00 a US\$ 450,00 por ha, além do incremento significativo de produtividade da água nestas áreas.

Uma tonelada de biomassa seca produz por hidrólise enzimática, aproximadamente 250 litros de etanol 2G, o que em valores atuais de mercado pago pelo consumidor final representa US\$125,00 por tonelada. A empresa GranBio em Alagoas tem pago ao produtor, em torno de US\$ 25,00 por tonelada de biomassa de palha entregue na usina. Considerando que a GranBio receberá 50 % do valor do etanol pago na bomba de combustível (US\$ 62,50), frente ao custo de US\$ 25,00 da biomassa pago ao agricultor, restará um valor de US\$ 37,50 por tonelada para remuneração do processo industrial e do investimento. Para enfardar cada tonelada de biomassa no campo, gasta-se em média 600 ml de diesel com o maquinário, sendo que o custo de amarrar este fardo (corda de nylon) situa-se em torno de US\$ 0,70.

A Usina Zilor de Lençóis Paulista-SP, tem sido pioneira na cogeração de energia elétrica a partir da palha recolhida em áreas de cana sob regime de parceria de plantio. O valor pago atualmente por tonelada de biomassa gira em torno de R\$ 130,00 pela palha triturada e R\$ 100,00 pela não triturada (umidade até 14% e impureza mineral até 4%). Atualmente 8 parceiros são fornecedores de biomassa enfardada para esta empresa.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos apresentou em 2005, um estudo denominado "*Billion Ton*", cujo objetivo foi determinar se as terras agrícolas dos EUA seriam capazes de fornecer biomassa vegetal suficiente para substituir pelo menos 30 % do consumo de petróleo, de modo a diminuir a emissão de carbono para a atmosfera provenientes dos combustíveis fósseis (PERLACK, 2005). Este estudo concluiu que já existem 1,3 bilhões de toneladas de biomassa disponíveis anualmente como resíduos de culturas agrícolas e florestais sobre o solo americano, sendo que quantidades complementares podem ser obtidas, com o cultivo de culturas energéticas específicas para esta finalidade. Neste estudo, sendo o valor do barril de petróleo US\$ 23,00 e o valor da biomassa US\$ 60,00 / tonelada, ambas as tecnologias apresentam o mesmo custo por unidade de energia US\$ 4,00 GJ⁻¹. No ano de 2011 foi lançado uma extensão deste trabalho denominado de "*Billion Ton Update*".

No final de 2007, o Departamento de Energia dos EUA (DOE), anunciou um financiamento inicial de 780 milhões de dólares por um período de 10 anos, para a criação de três Centros de Pesquisa em Bioenergia (BRCS) em território americano: (i) *Joint BioEnergy Institute* (JBEI), liderado por Lawrence Berkeley Laboratório, (ii) *Great Lakes Bioenergy Research Center* (GLBRC), liderado pelas Universidade de Wisconsin e Universidade Estadual de Michigan, e (iii) *Bioenergy Science Center* (BESC) liderado pelo *Oak Ridge National Laboratory*. A missão destes laboratórios é desenvolver abordagens científicas e de engenharia, juntamente com tecnologias de apoio, que estarão na base de conversão biomassa lignocelulósica em combustíveis líquidos de transporte.

Nos últimos 13 anos estes 3 centros de pesquisas tem desenvolvido trabalhos nas seguintes áreas do conhecimento: genômica, biologia microbiana, biologia vegetal, genética, proteômica, fisiologia, bioquímica estrutural, biologia computacional, bioinformática, engenharia agrícola e engenharia industrial, sendo que as linhas de pesquisas são: (i) produção e logística de biomassa com ênfase na sustentabilidade, (ii) otimização de culturas de bioenergia, (iii) a desconstrução da biomassa, e (iv) conversão de biomassa em combustíveis. O desafio final deste investimento é traduzir a ciência

básica desenvolvida ao longo dos anos, em tecnologia robusta que possa ser aplicado à indústria.

Por outro lado, na Europa, o desenvolvimento de indústria de biocombustíveis é incentivado pela *7th Framework Programme e pela European Biofuels Technology Platform* (FIORESE *et al.*, 2012). O orçamento de pesquisa e desenvolvimento voltada à bioenergia (líquida, sólida e gás) tem oscilado entre 300 e 450 milhões de dólares anuais divididos em vários países do bloco, sendo que os biocombustíveis líquidos ficam com aproximadamente 35 % destes recursos (160 milhões de dólares). Observa-se que o investimento anual em pesquisas voltadas à bioenergia da Comunidade Europeia é aproximadamente 4 vezes maior do que o investimento anual americano.

Na Europa a preocupação maior dos tomadores de decisão é assegurar uma coordenação de esforços dentro dos diversos países do bloco, a fim de que os biocombustíveis avançados (2G) tornem-se uma opção comercial, atingindo as metas estabelecidas pela Comissão Europeia. O foco principal desta estratégia é o investimento em pesquisa e desenvolvimento.

Analisando o investimento em pesquisas de biocombustíveis 2G no Brasil, estima-se um desembolso aproximado de 10 milhões de dólares anuais por parte da FAPESP (BIOEN), CNPq e FINEP. Esse baixo nível de investimento nacional em pesquisa, explica o fato de que o etanol de 2G implantado no Brasil (Raízen e Granbio) está se dando com o apoio tecnológico de empresas estrangeiras.

A operação das usinas 2G no Brasil encontram-se atualmente em fase de ajuste dos processos industriais. O maior problema até o momento, tem sido o teor de impurezas minerais (partículas de solo) presente na biomassa, que tem promovido o desgaste prematuro de importantes equipamentos no processamento desse material, ocasionando menor eficiência industrial do que previsto em projeto, por necessidade de paradas frequentes para manutenção.

No Congresso da ASABE (*American Society of Agricultural and Biosystems Engineering*), realizado na cidade de New Orleans em 2015, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) pela primeira vez, esteve presente de maneira institucional no encontro, sendo que a temática principal do evento girou em torno da Bioenergia. A palestra de abertura do *Bioenergy Focus Day* foi proferida pelo Prof. Rob Anex da Universidade de Wisconsin e intitulou-se: *The Bioenergy Water Nexus*, destacando a importância da água dentro da questão da bioenergia.

A divisão de Bioenergia do DOE tem desenvolvido estudos sobre a implantação das biorefinarias em território americano, em função do tamanho e do posicionamento das operações industriais frente à logística de recolhimento dos resíduos vegetais nas fazendas. Atenção especial está sendo dada ao aumento do tráfego de caminhões nas estradas e ferrovias, o que requer um estudo mais detalhado da infraestrutura local.

Um dos pontos críticos identificados no processo é a etapa de recolhimento da palhada no campo, uma vez que o maquinário é adaptado da produção de feno a partir de plantas forrageiras. Visando diminuir as impurezas nos fardos e aumentar a durabilidade do maquinário, o ideal seria que no momento de colheita do produto agrícola, os resíduos vegetais não fossem lançados sobre o terreno, mas diretamente para o processo de enfardamento, porém a questão a umidade do material é limitante. O DOE solicitou à ASABE esforços da sociedade para desenvolvimento deste tipo de maquinário.

A seguir será analisada a outra alternativa tecnológica remanescente para contribuir com a Revolução Azul no curto prazo, visando aumentar a eficiência do uso da água na agricultura: a Irrigação de Precisão.

1.11 Irrigação de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) foi inicialmente definida como: “aplicar o tratamento adequado, no local correto, no momento certo”; após vinte e cinco anos desde o início da implantação desta tecnologia no campo, observa-se que o conceito evoluiu para uma direção bem diferente da original: “um sistema de aproximação para manejar solos e cultivos agrícolas de modo a reduzir as incertezas de decisão, através de um melhor entendimento da variabilidade espacial e temporal do ambiente de produção” (DOBERMANN *et al.*, 2004; GEBBERS; ADAMCHUCK, 2010).

Diversas são as ferramentas utilizadas na agricultura de precisão: (i) mapeamento de colheita, (ii) orientação autônoma de máquinas no campo, (iii) tráfego controlado, (iv) amostragem georeferenciada, (v) sensoriamento remoto, e (vi) aplicação de insumos a taxa variável: sementes, água, corretivos, adubos, herbicidas, inseticidas e fungicidas.

A Irrigação de Precisão engloba todas as tecnologias da agricultura de precisão de sequeiro mais a aplicação de irrigação em taxa variável no campo. Atualmente este tipo de tecnologia é aplicada nos equipamentos de irrigação pressurizada dos tipos pivô central e localizada (gotejamento e microaspersão), sendo que a economia de água relatada com o uso desta tecnologia é variável entre 5 a 30%, dependendo da desuniformidade das plantas no campo, o que contribui para o aumento da eficiência do uso da água pelas culturas.

Existem algumas evidências científicas de que a Irrigação de Precisão pode reduzir a degradação ambiental, reduzindo a lixiviação de nitrato no solo para as águas subterrâneas, diminuindo os problemas de erosão no campo e reduzindo o uso de energia no bombeamento de água e nas operações agrícolas mecanizadas; porém estudos detalhados e a quantificação ambiental destes benefícios são incipientes na literatura.

De maneira geral, considera-se a Agricultura de Precisão (AP) uma tecnologia estratégica da agricultura do futuro. A questão em aberta atualmente é quais ferramentas serão adotadas e em que velocidade serão implementadas? É fato notório que a adoção da AP pelos agricultores está atrasada com relação às expectativas iniciais (GRIFFIN *et al.*, 2010; REICHARDT; JURGENS, 2009; MANDEL *et al.*, 2011).

Em aproximadamente 40% de um total de 108 estudos nos EUA, as tecnologias de agricultura de precisão não proporcionaram as vantagens esperadas (LAMBERT; LOWENBERG-DEBOER, 2000) sendo que em 60% dos casos apontados como lucrativos, custos importantes foram omitidos das análises econômicas apresentadas, como por exemplo: custos de amostragem de solo em grid, análise de dados, treinamento e consultoria especializada; somente 3 destes estudos foram publicados em periódicos científicos.

As maiores restrições na adoção da AP são a complexidade da tecnologia, o custo dos equipamentos e *softwares*, o tempo de aprendizado da tecnologia básica, a falta de recomendação técnica com embasamento científico sólido e conseqüentemente a imprevisibilidade da lucratividade proporcionada (ROBERTSON *et al.*, 2012).

As sementes transgênicas foram introduzidas no mercado agrícola na mesma época que as tecnologias da agricultura de precisão (1995), atualmente o nível de adoção das sementes transgênicas pelos agricultores de milho e soja é de 40 e 80%

respectivamente, muito superior à adoção das tecnologias de AP (<15%). Diferentemente das sementes cuja tecnologia está embutida no DNA das plantas, a *Agricultura de Precisão* requer em contrapartida um conhecimento tecnológico e gerenciamento de informação avançado por parte dos agricultores e de seus colaboradores.

As ferramentas de maior sucesso da Agricultura de Precisão nas grandes culturas agrícolas (soja, milho, algodão e cana) são aquelas consideradas mais simples do ponto de vista operacional e que não requerem intervenção humana: (i) a orientação autônoma de maquinário no campo (GPS/piloto automático), tornando o trabalho dos operadores mais eficiente, (ii) o tráfego controlado na área que minimiza a compactação do terreno, (iii) mapeamento de colheita e (iv) aplicação localizada de herbicidas (on/off) nas ervas daninhas no campo (JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2014).

A aplicação de insumos a taxa variável (VRT) em área total (água, corretivos, adubos, etc.) ainda não é dominada plenamente em nenhuma cultura. O diagnóstico preciso do que está causando a variabilidade das plantas no campo requer a quantificação de uma série de parâmetros, sendo que em diversas situações o “custo do diagnóstico de precisão” é superior ao “benefício da aplicação de precisão (taxa variável)”.

A aplicação de insumos em taxa variável na irrigação (Fertirrigação VRT) depende de uma base científica sólida para que as recomendações sejam mais assertivas. A complexidade de um sistema biológico na maioria dos casos não se resume exclusivamente à uma única variável sendo aplicada em taxa variável. O conhecimento agrônômico no seu maior grau de entendimento, tem que estar codificado em um algoritmo de tomada de decisão.

Uma das maiores causas de quebra de safras na agricultura de sequeiro é o *deficit* hídrico no solo. Os parâmetros de física de solo como retenção de água e condutividade hidráulica, assim como, o aprofundamento radicular das plantas que definem a disponibilidade de água no solo (CAD) para as plantas, não possuem sensores proximais que possam quantificá-los de maneira barata e precisa na agricultura de precisão.

Em um trabalho conduzido por Monteiro (2015) sobre as causas da quebra de produtividade (*yield gap*) na cultura da cana-de-açúcar no Brasil, o *deficit* hídrico no solo foi responsável por aproximadamente 70 % da queda de produtividade observada para diferentes regiões e anos agrícolas analisados no Brasil, enquanto que as práticas de manejo adotadas nas usinas, foram responsáveis por apenas 30 % desta queda de produtividade (variedades, adubação, controle de pragas, plantas daninhas e espaçamento de plantio). Estas proporções entre quebra de safra por *deficit* hídrico e por erros de manejo, varia em função do nível tecnológico da agricultura de cada localidade considerada: em municípios com alta tecnologia de produção agrícola (Rio Verde, GO), a quebra de safra é na maior parte das vezes decorrente da deficiência hídrica no solo (96%), pois os erros de manejo na cultura são mínimos (4%), já em outras regiões menos tecnificadas (Campos, RJ), a quebra de safra por deficiência hídrica é de apenas 38% na média dos anos, sendo por erros de manejo a quebra de safra é em torno de 62%.

A tentativa de se correlacionar a condutividade elétrica do solo ou a constante dielétrica do meio (equipamentos Veris e) com a textura e a disponibilidade hídrica do solo (CAD), mostra-se limitada em várias situações de campo, pois é influenciada pelo

tipo de solo (geologia), teor de umidade, teor de matéria orgânica e nível de salinidade da área.

Os modelos matemáticos de simulação do crescimento de plantas deverão trabalhar integrados à Agricultura de Precisão para que as recomendações de aplicação em taxa variável sejam mais precisas e eficientes. Dentre os modelos de simulação atualmente disponíveis, destacam-se duas plataformas: DSSAT, APSIM e AquaCrop. Estes modelos de simulação possuem uma base científica mecanística complexa e os dados de entrada podem ser rodados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfico), sendo estes modelos sensíveis à disponibilidade hídrica e ao teor de nitrogênio no solo. Com relação às pragas, doenças e ervas daninhas nas culturas, os modelos não são responsivos a estas questões até o presente momento.

Estas plataformas de simulação do crescimento das plantas, definem os diferentes ambientes de produção encontrados no campo, levando em consideração as particularidades genéticas das variedades de cada cultura, assim como, as condições climáticas de cada região, as características químicas e as características físicas do solo (capacidade de água disponível - CAD).

Um exemplo clássico destes modelos de simulação é a resposta da cultura de milho aos adubos nitrogenados aplicados, em função da distribuição das chuvas e das irrigações em cada ano agrícola considerado, de tal modo que a recomendação de adubação não é um valor fixo baseado unicamente na análise química de solo (por exemplo: Boletim 100 IAC), mas sim um valor variável, dependente da análise química de solo e da disponibilidade hídrica no solo durante o ciclo de cultivo (previsão de chuvas / irrigação).

A lucratividade da VRT é crítica para a adoção desta tecnologia pelos agricultores. Devido aos diversos fatores complexos envolvidos, a lucratividade da aplicação em taxa variável não é facilmente demonstrada em todos os cenários considerados (JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2014). Deve-se tomar cuidado para não se recomendar este tipo de tecnologia em áreas que não sejam responsivas (baixa variabilidade espacial). Os membros da comunidade europeia de AP decidiram se unir no desenvolvimento de um "*Precision Farming Calculator*" nos próximos anos, que permitirá identificar *a priori* as áreas de maior probabilidade de sucesso no uso desta tecnologia, provavelmente com base em imagens de satélites.

Outra recomendação da comunidade europeia de agricultura de precisão AP (JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2014) é que os trabalhos de pesquisas sejam conduzidos de maneira independente das empresas que comercializam equipamentos e prestam serviços nesta área de conhecimento, pois observa-se em diversos casos, uma influência tendenciosa em apresentar resultados mais promissores do que os realmente obtidos em campo, o que tem levado à recomendação indiscriminada desta tecnologia, mesmo em áreas não propícias ao retorno econômico.

Em um trabalho bastante detalhado sobre a viabilidade econômica de aplicação de adubos nitrogenados em taxa variável na Alemanha, Meyer-Aurich *et al.* (2008; 2010) obtiveram lucratividade variando entre 10 e 25 Euros por hectare. Contudo deve-se ter cautela com relação a estes números, uma vez que diversos estudos econômicos de longo prazo, não apresentam significância estatística favorável à aplicação em taxa variável de nitrogênio (BOYER *et al.*, 2011). Outros estudos (LIU *et al.*, 2006; ANSELIN *et al.*, 2004) apresentam valores de lucratividade abaixo de 8 Euros por hectare,

enquanto que na Dinamarca (OLESON *et al.*, 2004) não foi demonstrado viabilidade econômica da agricultura de precisão para VRT na aplicação de nitrogênio.

A possível explicação para o pequeno benefício de VRT na adubação, pode ser a pequena inclinação da curva de resposta próxima ao ponto ótimo que a agricultura mais tecnificada já se encontra; devido ao fato de a taxa de aplicação já estar próxima da máxima produtividade, o efeito observado de incremento de produtividade com base na variação da dose de adubo é apenas marginal (PANNELL, 2006).

Para a cultura do trigo na Inglaterra, o benefício econômico do piloto automático em máquinas agrícolas foi estimado e 2,2 Euros por hectare, enquanto que o tráfico controlado na área resultou em benefícios em torno de 20 Euros por hectare (KNIGHT *et al.*, 2009).

1.12 Agricultura aérea de precisão em áreas irrigadas

A Agricultura Aérea de Precisão (sensoriamento remoto e drones) é considerada a ferramenta de diagnóstico espacial, mais econômica, rápida e precisa que se tem disponível atualmente (RADOGLU-GRAMMATIKIS *et al.*, 2020). As imagens de sensoriamento remoto são empregadas inicialmente na varredura em macro escala da área de interesse, identificando áreas uniformes e apontando as zonas com maior desuniformidade. Posteriormente, sobrevoos com drones em altitudes mais baixas, e a obtenção de imagens de alta resolução convencionais, termais e multiespectrais, possibilitam o diagnóstico mais preciso desta variabilidade espacial, cuja causa deverá ser confirmada com base em amostragens de plantas e de solo em locais específicos selecionados dentro da área de interesse.

Se o diagnóstico da variabilidade for devido à compactação de solo ou a presença de nematoides na área, a recomendação ideal seria não aumentar a aplicação de adubos e nem água nestas áreas problemáticas, pois não haveria resposta das plantas, correndo o risco de perda de nitrogênio por desnitrificação. Se o diagnóstico da variabilidade espacial for a baixa fertilidade do solo, a aplicação de fertilizantes na área é recomendada, somente se houver previsão de umidade favorável no solo dentro da janela de tempo ideal de correção para a cultura, em função da data de plantio e do estágio fenológico.

A Irrigação de Precisão está sendo orientada inicialmente pela Agricultura Aérea de Precisão, com base nos mapas de índices de vegetação NDVI, VDVI, SAVI, MSAVI, CWSI, etc., obtidos por imagens multiespectrais de sensoriamento remoto (*Landsat*: resolução de 30 x 30 m nas bandas convencionais e 100 x 100 m banda térmica e *Sentinel 1 e 2*) ou por imagens aéreas obtidas a partir de drones (resolução 3 x 3 cm) de tal modo que quanto maior o NDVI, maior será a lâmina de irrigação a ser aplicada, com base em um valor escalar multiplicativo definido pelo usuário, a ser considerado nas diferentes zonas de manejo consideradas. Esta estratégia de manejo não visa corrigir o problema da variabilidade das plantas no campo, apenas evitar o desperdício de água na irrigação.

A resolução destas imagens é bastante variável e o valor ideal depende do objetivo a ser focado. Satélites como o *Rapid Eye*, *Ikonos* e os recém lançados *WorldView3* e *PlanetLab* (2020), possuem melhor resolução espacial do NDVI, 5 x 5 m, 1 x 1 m e 0,3 x 0,3 m respectivamente, sendo suas imagens vendidas comercialmente.

A utilização de imagens térmicas (IVTer) obtidas a partir de drones, permite detectar se as plantas estão apresentando temperatura foliar mais elevada, o que seria um indicativo de stress hídrico nestas áreas, possibilitando o mapeamento da CAD do solo e da profundidade radicular simultaneamente na área. Por outro lado, imagens

hiperespectrais possibilitam a quantificação do teor de clorofila e de carotenos destas plantas. Juntamente com validações de campo, estas imagens mais sofisticadas podem auxiliar na tomada de decisão mais racional sobre fertirrigação em taxa variável. Os algoritmos e softwares de como unir todas estas informações e oferecer uma recomendação em VRT de irrigação e adubação são complexos e estão em fase preliminar de desenvolvimento e validação em campo. O preço de aquisição destas câmeras está em torno de 20 a 200 mil dólares, o que inibe seu uso pelos agricultores no momento, sendo mais utilizadas em projetos de pesquisas.

O maior benefício econômico em agricultura aérea de precisão é relatado para a cultura da uva *Padthaway Shiraz*, visando a produção de vinho na Austrália (BRAMLEY *et al.*, 2005). O benefício econômico de se efetuar uma colheita seletiva na área com base no índice *PCD* (*plant cell density index*: relação da reflectância: *infrared/red*) calculado com base em imagens multiespectrais de alta resolução (drones), foi de US\$ 8.096,00 por hectare para a venda de uva mais padronizada e de US\$ 64.228,00 por hectare para a produção de vinho de maior qualidade, em uma área de 4,25 h. Observa-se neste caso, que não foi feita nenhuma aplicação de insumos a taxa variada, somente a colheita seletiva em função do "vigor" das plantas no campo; esta tecnologia de viticultura de precisão é uma das mais promissoras na área de agricultura de precisão, em função da altíssima rentabilidade por unidade de área na produção de vinho.

Os investimentos privados em pesquisas de novas tecnologias na agricultura no ano de 2019 nos EUA, foram de US\$ 4,70 bilhões, segundo o relatório americano da *AgFunder* (2020), divididos da seguinte maneira: (i) 23 % em Biotecnologia (genética animal e vegetal, microbiomas e bem estar animal); (ii) 20 % em Novidades de Sistemas de Cultivo (fazendas urbanas, psicultura, produção de insetos e algas); (iii) 19 % em *Softwares* para Gestão de Fazendas, Sensoriamento e IoT (dispositivos para captura de dados agrícolas, softwares para suporte à decisão e análise de banco de dados); (iv) 14% em Plataformas de Venda de Commodities Agrícolas (comércio e leasing de equipamentos); (v) 12 % em Bioenergia e Biomateriais (processamento de resíduos na fazenda, biodigestores anaeróbicos e produção de biomateriais); (vi) 4% em Plataformas de Vendas Direta da Fazenda (fazendeiros comercializando seus produtos diretamente com os consumidores finais); (vii) 4 % em Robótica Agrícola e (viii) 3% Outras tecnologias.

A captura de dados agrícolas no campo foi dominada pelo sensoriamento remoto (satélites) e drones em 2019. Algumas startups de tecnologia de VANT tiraram o foco da agricultura, desanimados pela complexidade e desafio de criar valor para os agricultores a partir de seus produtos. Somente as empresas pioneiras em drones especializadas em áreas agrícolas, conseguiram recursos financeiros significativos de investidores para continuar seus desenvolvimentos em 2019: *PrecisionHawk* (softwares para análise de dados aéreos agrícolas) e *DroneDeploy* (novos negócios agrícolas).

Os investimentos em *startups* de robótica na agricultura ainda são surpreendentemente baixo no ano de 2020. Apresentam-se muitos conceitos futuristas nesta área do conhecimento, mas os investidores não estão dispostos a arriscarem em um mercado ainda não consolidado e incerto no curto prazo.

1.13 Considerações finais

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de açúcar, citros, café, soja e carnes (bovina e frango) e *player* de destaque na produção de milho e algodão. Quando se analisa o potencial de produção da Agricultura Irrigada de alimentos, fibras e

bioenergia em solo nacional, vislumbra-se o potencial agro-econômico que o país possui e que será incrementado ainda mais no futuro, em função da necessidade que o mundo tem da "água doce virtual" aqui disponível, vinculada aos produtos agrícolas que são exportados pelo agronegócio brasileiro.

A Engenharia de Irrigação no Brasil tem uma importante missão a cumprir na implantação e na operação de aproximadamente 60 milhões de ha a serem irrigados nas próximas décadas. O correto planejamento destes projetos e a primorosa gestão dos recursos hídricos, energéticos e ambientais envolvidos, serão os pilares de sustentação deste grande desafio no contexto da Revolução Azul.

A oportunidade de acesso aos melhores equipamentos de irrigação disponíveis no mercado mundial e a experiência acumulada na agricultura irrigada em diferentes países, coloca o Brasil em posição estratégica para liderar a Eficiência do Uso da Água na produção agrícola irrigada do século XXI.

É de responsabilidade das universidades brasileiras, através de seus cursos de Engenharia Agrônômica e de Engenharia Agrícola, em níveis de graduação e de pós-graduação, promover a qualificação dos recursos humanos necessários para dar suporte a esta empreitada.

Aos ombros dos pesquisadores e cientistas nas áreas de Engenharia de Irrigação e Engenharia de Água e Solo, recai a nobre missão de orientar os rumos dos "trilhos" a serem implantados no futuro, para que "as locomotivas e os vagões" da iniciativa privada e da extensão rural, desenvolvam os trabalhos necessários, para conduzir a agricultura irrigada brasileira ao apogeu da Revolução Azul.

Referências

ANSELIN, L.; BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. **American Journal of Agricultural Economics**, v.86, n.3, p.675-687, 2004.

ALMEIDA, A.N.; COELHO, R.D.; COSTA, J.O.; FARÍAS, A.J. Methodology for dimensioning of a center pivot irrigation system operating with dripper type emitter. **Engenharia Agrícola**, v.37, p.828-837, 2017.

BHATIA, R.; CESTTI, R.; WINPENNY, J. Water conservation and reallocation: best practice cases in improving economic efficiency and environmental quality. Washington, DC., **World Bank Report**, 1995.

BOYER, C.N.; WADE BORSEN, B.; SOLIE, J.B. Profitability of variable rate nitrogen application in wheat production, **Precision Agriculture**, v.12, p.473-487, 2011.

BRAMLEY, R.G.V.; PROFFITT, A.P.B.; HINZE, C.J.; PEARSE, B.; HAMILTON, R.P. Generating benefits from precision viticulture through selective harvesting. In: STAFFORD, J.V. (Ed.) Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture. **Wageningen Academic Publishers**, The Netherlands, p.891-898, 2005.

BUTZER, K.W. **Early hydraulic civilization in Egypt: a study in cultural ecology**. The University of Chicago Press 1976.

COELHO, R.D. **Characterization of center pivot irrigation system (low energy precision application - LEPA) under reservoir tillage**. 236 p., 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

COELHO, R.D.; LIZCANO, J.V.; DA SILVA BARROS, T.H.; DA SILVA BARBOSA, F.; LEAL, D.P.V.; DA COSTA SANTOS, L.; RIBEIRO, N.L.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; MARTIN, D.L. Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.103, p.399-407, 2019.

- COELHO, R.D.; MARTIN, D.L.; CHAUDHRY, F.H. Effect of LEPA irrigation on storage in implanted reservoirs. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, n.4, p.1287-1298, 1996.
- DOBERMANN, ACHIM; BLACKMORE, SIMON; COOK, SIMON; ADAMCHUK, VIACHESLAV. Precision Farming: Challenges and Future Directions. In: PAPER 4TH INTERNATIONAL CROP SCIENCE CONGRESS. Brisbane, Australia, 2004.
- FIORESE, G.; CATENACCI, M.; VERDOLINI, E.; BOSETTI, V. **Advanced Biofuels**: Future Perspectives from an Expert Elicitation Survey. Fondazione Eni Enrico Mattei. Nota di Lavoro 67, 2012.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. Precision agriculture and food security. **Science**, v.327, p.828-831, 2010.
- GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A.Y. The Water Footprint of Sweeteners and Bio-ethanol. **Environmental International**, v.40, p. 202-211, 2012.
- GRIFFIN, T.; BONGIOVANNI, R.; LOWEBERG-DEBOER, J. Worldwide adoption of precision agriculture technology: The 2010 update, In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, July 18-21, Denver Colorado, 2010.
- HILLEL, D. **Rivers of Eden**. New York, Oxford University Press, 1994.
- HOEKSTRA, A.Y. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, 12–13 December 2002, **Value of Water Research Report Series**, n.12, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands. Disponível em: www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf, 2003. Acesso em: 19 mar. 2021.
- HOEKSTRA, A.Y.; HUNG, P.Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. **Value of Water Research Report Series**, n. 11, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, Disponível em: www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf. 2002. Acesso em: 19 mar. 2021.
- JOINT RESEARCH CENTER OF THE EUROPEAN COMMISSION. Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers - Potential Support with the CAP 2014-2020. European Parliament. Policy Department B: Structural and Cohesion Policies. **Agricultural and Rural Development**, JCR, 2014.
- KISEKKA, I.; NGUYEN, G.; AGUILAR, J.P.; HOGERS, D.H. **Comparing mobile drip irrigation to low elevation spray application**, 2015. Disponível em: http://www.kwo.org/Projects/GovernorsConference2015/PowerPoints/Comparing_MDI_and_LESA_Governors_water_conference_revised-12-13-2015.pdf. Acesso em: 21 abr. 2016.
- KNIGHT, S.; MILLER, P.; ORSON, J. An up-to-date cost/benefit analysis of precision farming techniques to guide growers of cereals and oil seeds. **HGCA Research Review 2009**, n.71, p.115. 2009.
- LAMBERT, D.; LOWENBERG-DEBOER. **Precision Agriculture Profitability Review**. Purdue University West Lafayette, IN. 2000.
- LIU, Y.; SWINTON, S.M.; MILLER, N.R. Is site specific yield response consistent over time? Does it pay? **American Journal of Agricultural Economics**, v.88, p.471-483, 2006.
- MANDEL, R.; LAWES, R.; ROBERTSON, M. What's preventing growers from implementing precision agriculture? **Agribusiness Crop Updates**. Perth, 2011.
- MANN, C.C. Crop scientists seek a new revolution. **Science**, 15 Jan. 1999.
- MEKONNEN, M.M.; PAHLOW, M.; ALDAYA, M.M.; ZARATE, E.; HOEKSTRA, A.Y. Sustainability, efficiency and equitability of water consumption and pollution in Latin America and the Caribbean. **Sustainability**, v.7, n.2, p.2086-2112, 2015.
- MEYER-AURICH, A.; GANDORFER, M.; HEIBENHUBER, A. Economic analysis of precision farming technologies at the farm level: two German case studies. In: CASTALONGE, O.W. **Agricultural Systems**: Economics, Technology and Diversity, Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, p.67-66, 2008.

MEYER-AURICH, A.; WEERSINK, A.; GANDORFER, M. Optimal site-specific fertilization and harvesting strategies with respect to crop yield and quality response to nitrogen, **Agricultural Systems**, v.103, p.478-485, 2010.

MONTEIRO, L.A. **Sugarcane yield gap in Brazil: a crop modelling approach**. 129p., 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MORGAN, R.M. Water and the land: a history of American irrigation. Fairfax, VA, **The Irrigation Association**, 1993.

OLESON, J.E.; SORENSEN, P.; THOMSON, I.K. Integrated nitrogen input systems in Denmark. In: **Agriculture and nitrogen cycle**, Island Press, Washington, Covelo, London, p.129-140, 2004.

PANNEL, D.J. Flat earth economics: the far-reaching consequences of flat payoff functions in economic decisions making. **Review of Agricultural Economics**, v.28, p.553-566, 2006.

PERLACK, R.D.; STOKES, B.J. (Leads), ORNL/TM-2011/224. U.S. Department of Energy. U.S. Billion-Ton update: biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 227p., 2011.

PERLACK, R.D.; WRIGHT, L.L.; TURHOLLOW, A.F.; GRAHAMN ROBIN, L.; STOKES, B.J.; ERBACH, D.C. ORNL/TM-2005. U.S. Department of Energy. U.S. Billion-Ton: Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a Billion-Ton Annual Supply. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 60p., 2005.

PONTING, C.A **Green history of the world**. New York; Penguin Books, 1991.

POSTEL, S. Pillar of Sand. World Watch Books. Norton & Company, New York/London. 1999.

RADOGLUO-GRAMMATIKIS, P. *et al.* **A compilation of UAV applications for precision agriculture**. Computer Networks, v.172, 2020.

REICHARDT, M.; JURGENS, C. Adoption and future perspective of precision farming in Germany: Results of several surveys among different agricultural target groups. **Precision Agriculture**, v.10, n.1, p.73-94, 2009.

ROBERTSON, M.J.; LIEWELLYN, MANDEL, R. Adoption of variable rate fertilizer application in the Australian grains industry. Status, issues and prospects. **Precision Agriculture**, v.13, n.2, p.181-199, 2012.

SANTOS, L.C.; COELHO, R.D.; BARBOSA, F.S.; LEAL, D.P.V.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; BARROS, TIMÓTEO, H.S.; LIZCANO, J.V.; RIBEIRO, N.L. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. **Agricultural Water Management**, v.221, p.322-333, 2019.

SHARMA, K.; IRMAK, S.; KUKAL, M.S. Propagation of soil moisture sensing uncertainty into estimation of total soil water, evapotranspiration and irrigation decision-making. **Agricultural Water Management**, v.243, p.106-454, 2021.

SHIKLOMANOV, I.A. **Rise in irrigation water use**. Assessment of Water Resource and Water Availability in the World. State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia, 1996.

SPAVOREK, G.; DOURADO NETO, D.; BARRETO, A.; PAGANINI, S.; MAULE, R., ASSUNÇÃO, A.; REZENDE, L. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Projeto de Cooperação IICA/Ministério da Integração Nacional BRA 08/002, 2014.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v.25, p.189-207, 2007.

STONE, I. **Canal Irrigation in British India**. Cambridge, U.K. Cambridge University Press, 1984.

WEISS, H. The Genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization, **Science**, 20 aug. 1993.

WILFORD, J.N. Collapse of Earliest Known Empire is Linked to Long, Harsh, Drought. **New York Times**, 24 ago. 1993.

WORSTER, D. **Rivers of the empire**: water, aridity and the growth of the American west. New York. Oxford University Press, 1985.

CAPÍTULO 2

2 PIVÔ CENTRAL: HISTÓRIA, MERCADO, TECNOLOGIA E FUTURO

Renato Silva

Resumo

O sistema de irrigação por pivô central tem uma longa trajetória de serviços prestados à agricultura brasileira e mundial, tornando-se o principal sistema de irrigação global. Sua história, do surgimento até os dias de hoje, está intimamente ligada à história da Empresa Valmont que, através da visão e liderança de Robert Daugherty, transformou um protótipo desenvolvido no estado de Nebraska, EUA, em um sistema mundial de irrigação.

No Brasil, foi somente nos últimos 20 anos que essa tecnologia abrangeu uma área superior a 1,4 milhões de ha, o que equivale a cerca de 21% da área irrigada brasileira em culturas intensivas e extensivas do norte ao sul do país, um mercado crescente e de alta tecnologia, dando suporte a uma agricultura irrigada sustentável. O pivô central, assim, se insere como uma resposta clara para a necessidade produtiva, em plataformas que tem como base quatro grandes pilares: o monitoramento/controle, previsão/planejamento, otimização/aplicação e, informações/análises.

Toda a tecnologia e avanço do sistema pivô central demanda uma rede de distribuição ampla e bem estruturada e processos de governança bem definidos envolvendo transparência, responsabilidade corporativa, equidade e prestação de contas. A tecnologia contribui de forma efetiva para a democratização da agricultura irrigada, permitindo que cada vez mais produtores tenham acesso à irrigação por pivô central, com sistemas que se adaptam a diversos tipos de solo e topografia.

Do ponto de vista da sustentabilidade dois pontos são avaliados, a importante definição da expansão da agricultura irrigada em áreas já utilizadas para agricultura de sequeiro e pastagens e, por outro lado, o uso de energia fotovoltaica em grande escala. O Brasil tem um potencial de expansão da agricultura irrigada em áreas de intensificação e sobre áreas de pastagem da ordem de 56 milhões de ha, representando um potencial efetivo de curto e médio prazo de 13,7 milhões de ha, cujo ritmo de expansão atual deveria, em média, dobrar para atingir estes valores em 2050, quando a FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2009a) estima ser necessário aumentar a produção mundial em pelo menos 60%.

Uma das grandes limitações no desenvolvimento da agricultura irrigada é a disponibilidade de energia. Nesse âmbito a energia solar tem se destacado como opção no mercado brasileiro. Frente a tudo isto, uma questão importante é o desenvolvimento de políticas públicas que possam incentivar o setor de irrigação à adoção desta fonte de energia limpa, renovável, eficiente e abundante.

2.1 Introdução

A agricultura irrigada brasileira avança de forma estruturada e sustentável nos últimos anos. O pivô central tem sido um importante sistema de suporte neste crescimento em função das suas características de aplicação de água que favorecem a eficiência com grande robustez e durabilidade.

O pivô central é um equipamento que caracteriza o principal sistema de irrigação por aspersão mecanizada e seu uso tem se expandido de forma significativa em função da sua operacionalidade e da qualidade da irrigação, destacando-se a uniformidade de distribuição de água, o fácil controle da lâmina d'água aplicada, a grande versatilidade para as diversas condições de topografia e tipos de solo, o menor dispêndio de mão-de-obra e, também, as novas tecnologias incorporadas nos últimos anos, que garantem um controle total do sistema (BERNARDO *et al.*, 2019).

O pivô central é um sistema de irrigação que se movimenta de forma mecânica e sua composição é feita por uma linha lateral de aço com saídas para emissores. A linha lateral é suspensa por torres de sustentação com rodas na base de diâmetro variado em função do tamanho do equipamento. Este tipo de sistema de aspersão irriga uma área circular através da rotação da sua linha lateral em torno de um ponto fixo, denominado como 'ponto do pivô'. A lateral móvel pode se estender além da última torre; esta extensão é denominada 'lance em balanço' e, em algumas situações, pode ter um canhão final acoplado na sua extremidade. Para que o canhão final opere com maior eficiência é comum à instalação de uma bomba de apoio (*booster*) para a elevação da pressão de saída da água a ser aplicada pelo canhão final. (COLOMBO, 2003).

Na Figura 1 a seguir, apresenta-se uma vista lateral de um sistema implantado e, na Figura 2, uma vista superior de uma fazenda irrigada com o sistema pivô central.



Figura 1. Vista lateral de um sistema de irrigação do tipo pivô central.

Um dos principais levantamentos de expansão da área irrigada no Brasil por todos os sistemas de irrigação e em especial do pivô central é feito pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação da CSEI/Abimaq (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021). No último levantamento do período de 2000-2020, o total de área irrigada pelo sistema pivô central é estimado em 1,42 milhões de ha, o que quando somado às áreas já existentes antes deste período, está em consonância com os resultados do estudo da Embrapa (GUIMARÃES; LANDAU, 2020) que, utilizando sensoriamento remoto obteve um resultado total de 1,6 milhão de hectares com pivô central no País.

Nas Figuras 3 e 4, apresenta-se a evolução da expansão anual da área irrigada por pivô central assim como a evolução da expansão anual acumulada no Brasil.



Figura 2. Vista geral de área irrigada por pivô central.

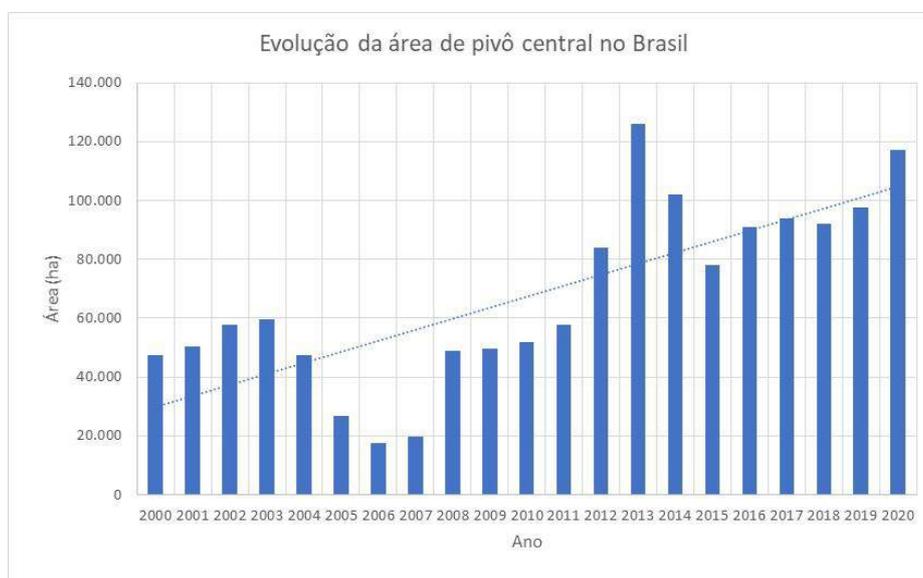


Figura 3. Evolução anual de expansão anual da área irrigada por pivô central no período de 2000 a 2020 e a evolução da taxa média (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021).

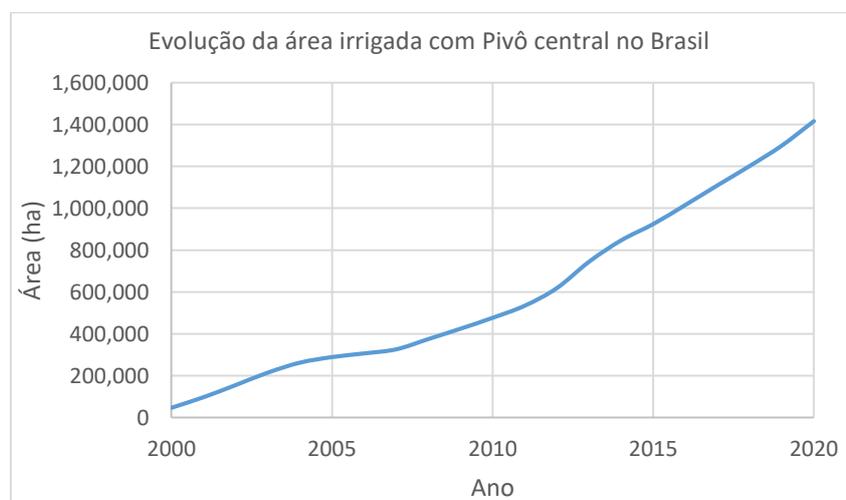


Figura 4. Evolução anual acumulada de expansão anual da área irrigada por pivô central no período de 2000 a 2020 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021).

2.2 História

Platão, na Grécia Antiga, afirmava que “a necessidade é a mãe da invenção”. A história do pivô central mostra como a criatividade humana agiu para resolver problemas por meio da inovação e da tecnologia.

A história do desenvolvimento do sistema pivô central, remonta ao estado do Nebraska, centro-oeste dos EUA, nos últimos 70 anos e está intimamente ligada à história da Empresa Valmont, cuja sede se encontra na cidade de Omaha-NE nos EUA e que, no Brasil, estabeleceu-se em Uberaba, MG.

Em 1947, o inventor Frank Zybach desenvolveu o protótipo de uma máquina de irrigação por pivô central. Nos anos que se seguiram, ele modificou e refinou o design para melhorar a eficiência operacional e, em 1954, licenciou sua patente para o empresário Robert Daugherty (Valley Manufacturing). Na década seguinte, o protótipo foi aprimorado e, com o tempo, foi se tornando mais robusto, mais alto e mais confiável. Em questão de poucos anos, a tecnologia já era considerada inovadora e apresentava uma grande novidade: o pivô possibilitava irrigar terrenos que não eram totalmente planos. Isso viabilizaria muitas áreas que, até então, eram consideradas inadequadas para a agricultura. Além disso, esta evolução levou à substituição do sistema de movimentação por energia hidráulica para acionamento elétrico (LIVING HISTORY FARM, 2021).

Na Figura 5 a seguir, apresenta-se uma vista de um modelo de pivô central antigo com sistema de movimentação hidráulico e também a de um modelo de sistema atual com a foto de Robert Daugherty, criador da empresa Valmont e um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento e expansão do sistema pivô central no mundo.

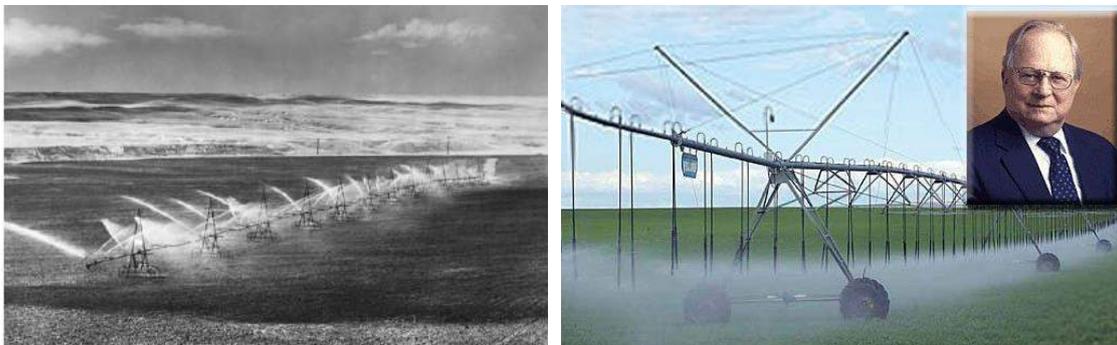


Figura 5. Vista de um modelo de pivô central antigo e de um modelo novo com a foto do Robert Daugherty, criador da empresa Valmont (LIVING HISTORY FARM, 2021).

Nos anos 50, começaram a surgir modelos viáveis para produção em grande escala. Aos poucos, a tecnologia evoluiu, culminando nas soluções completas e polivalentes que conhecemos hoje. Na década de 1960, a Valley Manufacturing tornou-se a Valmont Industries, Inc., iniciando o processo de internacionalização com a exportação do primeiro pivô para a França. Ainda no final dessa mesma década, deu início ao processo de galvanização por imersão à quente, num esforço de melhoria contínua. Nas décadas seguintes, a empresa continuou seu processo de desenvolvimento tecnológico, lançando produtos que permitiram o avanço desse sistema mundialmente (LIVING HISTORY FARM, 2021).

No Brasil, a Valmont tem mais de meio século de história. Tudo começou em 1954 com a fundação da Asbrasil, em São Bernardo do Campo (SP), para a produção de conjuntos de irrigação convencionais com aspersores “perrot”, além de tubos de aço. Vinte e um anos depois, passou também a fabricar os primeiros autopropelidos do Brasil.

Em 1978, a empresa juntou-se à americana Valmont, quando fabricaram o primeiro pivô central do Brasil. Em 1989, a Asbrasil foi transferida para Uberaba e, em 1997, a Valmont adquiriu o seu controle acionário, tendo adquirido todas as cotas da empresa até o início de 2018. A nova empresa, a Valmont Indústria e Comércio Ltda, deu início, então, à fabricação do Pivô Valley 8000 (VALLEY, 2002).

Atualmente, na segunda década do século XXI, está em curso a transição para uma nova era, onde as tecnologias de irrigação transitam entre a Agricultura 4.0 e 5.0, onde é a protagonista. Nessa nova forma de irrigação de precisão, as tecnologias agregam alta precisão e conexão com a internet, combinando informações para melhorar a performance durante todos os estágios de produção e contribuindo para aumento da produtividade, redução de custos, uso racional de insumos agrícolas e melhora nos rendimentos. Proliferam os sensores sem fios, câmeras multiespectrais plataformas de integração de dados, sensores do solo, da planta e do clima, algoritmos de inteligência artificial ("machine learning") e soluções robóticas (AGRONEGOCIO, 2021).

Toda essa tecnologia permite gerenciar de forma inteligente os sistemas de irrigação por pivô central à distância, recebendo informações estruturadas referentes ao clima, demanda hídrica da cultura, recomendação de lâmina a ser aplicada, identificação de doenças e pragas na área do pivô central através de sensores e câmeras especiais montadas na estrutura. Também avançam as possibilidades de uso do pivô para a aplicação de água e fertilizantes de forma específica e em quantidade necessária em cada ponto da área, através de mapas obtidos do sensoriamento remoto ou análises em tempo real.

2.3 Mercado

À medida que as inovações tecnológicas avançam e tomam conta do agronegócio, um aspecto se revela cada vez mais claro, a denominada Irrigação Inteligente. Esta apresenta-se como uma parte essencial do futuro do setor, seja no intuito de suprir uma demanda crescente por alimento, seja para maximizar a eficiência energética e produtiva.

Para ser considerada inteligente, a irrigação precisa ir além da simples aplicação de água nas lavouras, devendo incorporar necessariamente novas tecnologias que permitam um alto grau de automação do sistema de irrigação, avanço esse já visível em muitas propriedades rurais.

Para concretizar essa irrigação automatizada e inteligente, é preciso utilizar equipamentos que permitam o acréscimo de diferentes soluções, sendo que o sistema pivô central vem incorporando cada dia mais tais tecnologias voltadas para o futuro.

Os pivôs são a forma de irrigação que mais cresce no Brasil, o que pode ser confirmado pelo último Censo Agropecuário do IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017). Entre 2006 e 2017, os resultados apontam um aumento de 542 mil hectares na área ocupada por pivôs no país. A participação deste tipo de equipamentos passou de 19,6% para 20,8%.

Comparando os dados de 2017 e 2000 com base nos Censo Agropecuário (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017), observa-se muitos municípios brasileiros com crescimento superior 150% na área usada com pivôs centrais, chegando em alguns casos, a aumentos superiores a 500%, principalmente nos estados do Mato Grosso e Rio Grande do Sul. Essa área irrigada abrange uma grande variedade de culturas, estimando-se que entre 90 e 95% dela seja ocupada, principalmente, com lavouras de soja, milho, feijão e cana-de-açúcar. Em menor

proporção, também se encontram culturas de algodão e café. É importante, também, citar a olericultura, que abrange as culturas folhosas, raízes, bulbos, tubérculos e alguns frutos como o melão e a melancia, ocupando aproximadamente 5% da área total.

Observa-se um crescimento significativo da área irrigada por pivô central no Brasil. Em 1985, a primeira edição da pesquisa identificou uma área irrigada por pivô de 31 mil ha, ocupados por cerca de 363 equipamentos. Em 2000, um novo levantamento calculou 490,5 mil ha e 6.680 equipamentos. O Censo agropecuário de 2017 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017) indica uma aceleração dessa expansão a partir de 2010, indicando que a área havia triplicado para 1,42 milhões de hectares. Os números do Censo Agropecuário de 2017 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017) foram muito próximos dos valores de 1,48 milhões ha levantados no estudo de 2017 e publicados no Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 222 da Embrapa Milho e Sorgo (GUIMARÃES; LANDAU, 2020), com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto.

Na Tabela 1, apresentam-se os resultados comparativos de expansão da área irrigada por pivô central em 2017 e 2020 para os estados com pelo menos 100 unidades. Observa-se na tabela que os valores totais de área irrigada com sistemas pivô central aumentou em 136.515 ha, levando a um aumento de 23.181 para 25.292 equipamentos.

Tabela 1. Variação da quantidade (frequência de instalação – número de equipamentos, NE) e área potencialmente irrigada (API, ha) pelos pivôs centrais levantados em 2017 e 2020 por estado com pelos menos 100 unidades (GUIMARÃES; LANDAU, 2020).

Estado	NE		API	
	2017	2020	2017	2020
MA	69	112	5.491,80	8.797,00
MT	929	1.117	113.124,90	138.043,00
PR	207	249	12.255,80	14.633,30
TO	156	185	14.392,40	16.890,10
SP	4.262	4.734	190.507,10	213.137,00
MG	7.401	8.541	452.189,60	501.183,60
BA	3.110	3.099	216.631,40	236.491,40
RS	1.683	1.813	110.858,50	118.718,60
GO	3.945	4.207	272.329,50	289.910,90
DF	256	270	14.417,40	14.979,10
ES	309	305	14.418,20	14.250,70
CE	144	127	8.421,60	6.934,20
MS	320	239	31.878,50	22.661,50
AL	117	41	4.014,00	1.456,90
Brasil	23.181	25.292	1.476.100,85	1.612.617,30

Também é importante citar os dados do Atlas Irrigação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021), que indicaram uma área de agricultura irrigada

no Brasil de 8,2 milhões de hectares irrigados, sendo 25% com a cultura do arroz, 8% com a cultura do café, 27 % com culturas anuais em pivôs centrais e 25% com as demais culturas e sistemas. A cana-de-açúcar ocupa 15 e 35,5% desse montante respectivamente para água e fertirrigação (água e a vinhaça que é um subproduto da produção de álcool e açúcar).

Assim, o país ocupa a sexta posição na lista das nações com as maiores áreas equipadas para irrigação, atrás da China, EUA, Índia, Paquistão e Irã (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2019).

A ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021) também cita uma expansão de 4,2 milhões de hectares irrigados até 2040, reforçando a importância do Brasil enquanto fornecedor de alimentos para todo o mundo, embora exista um potencial de crescimento maior quando consideradas a disponibilidade de áreas aptas, a demanda dos produtores e a capacidade industrial do país. Para se chegar a esse nível de expansão, é necessária uma boa gestão dos recursos naturais e, claro, da tecnologia disponível no mercado. Nesse sentido, os pivôs centrais despontam em relação a outras formas de irrigação.

2.4 Tecnologia

Os pivôs de hoje já são equipados com diversas soluções altamente tecnológicas, inexistentes há poucos anos atrás. Painéis inteligentes agem como estações meteorológicas para entregar informações atualizadas e em tempo real ao produtor. Softwares de bancos de dados armazenados na nuvem permitem que o produtor controle o seu sistema de irrigação a partir do tablet, smartphone ou computador, eliminando a necessidade de se deslocar até a fazenda.

Além disso, os pivôs centrais oferecem versatilidade para cada situação. É possível, por exemplo, adaptar o equipamento para fazer a fertirrigação das lavouras. Outras soluções permitem o uso do pivô até em terrenos acidentados.

Também vale ressaltar o potencial do pivô central para a tendência mundial de se trabalhar a irrigação (e a agricultura, em geral) de forma mais sustentável e ecológica. Fontes de energia renovável, como a solar, são cada vez mais acessíveis e eficientes – e já existem no mercado algumas alternativas às fontes convencionais de energia, tornando o pivô um equipamento ainda mais completo.

É importante também considerar o manejo de irrigação tecnificado, que permite ao produtor gerenciar de forma efetiva a decisão da irrigação, mantendo as condições ótimas para a cultura, sem excesso e com otimização do uso de energia (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). As orientações técnicas são realizadas através de dados das culturas, do clima, do solo, de imagens de satélites, entre outros pontos, visando orientar o produtor sobre quando ele deve irrigar e a quantidade de água a ser utilizada de acordo com a cultura e seus diferentes estágios.

O sistema Irriger Connect (IRRIGER, 2021) do grupo Valmont, através de sua plataforma na web, possibilita a realização do balanço hídrico com base nas informações climáticas, nos sensores de umidade de solo e no banco de imagens de satélite, permitindo um manejo baseado na otimização do uso de água e energia, na redução de custos e no aumento da produtividade das culturas. A plataforma on-line contribui ativamente para uma irrigação rentável e econômica.

Vale salientar que o sistema pivô central é um projeto muito bem estruturado e otimizado. Primeiro, são executados levantamentos que abrangem topografia do terreno, energia, licença de outorga d'água, dentre outros pontos, que definem a

intensidade de aplicação, lâmina a ser aplicada associada à(s) cultura(s) exploradas (BERNARDO *et al.*, 2019).

Outro pilar fundamental que agrega diretamente à eficiência dos equipamentos, é a capacidade de embarcar tecnologias – por exemplo, buscando uma maior eficiência, o sistema de irrigação de taxa variável VRI (do inglês “*Variable Rate Irrigation*”) e outras tecnologias de agricultura de precisão embarcada ao equipamento. A tecnologia VRI oferece um sistema que atua em taxa variável, performando através da leitura de um mapa de prescrição, e permite ligar, desligar e controlar a irrigação por aspersor, individualmente. Aliada aos mapas, há a possibilidade de variação de lâmina por ângulo, por lance, chegando até em nível individual por aspersor e automação – estas coletadas e executadas por meio dos painéis inteligentes Valley da linha ICON (VALLEY, 2021).

As tecnologias de irrigação estão preparadas para atender à demanda com eficiência e devem ser a resposta mais clara para a necessidade produtiva. A instalação de um pivô central proporciona o plantio continuado, de mais de uma cultura em um ano agrícola, otimizando o uso do solo, da infraestrutura, da mão de obra, gerando maior rentabilidade e desenvolvimento para região (BERNARDO *et al.*, 2019).

Faz-se significativo destacar e reafirmar a tecnologia Valmont relacionada ao manejo da irrigação e ao sistema pivô central. A grande escala de informações agregadas pelo Irriger Connect prepara o produtor para a manutenção de uma irrigação responsável e sustentável, tendo em vista a preservação dos recursos hídricos (IRRIGER, 2021). A tecnologia Valley disponibiliza linhas de produtos tecnológicos completas que abrange painéis inteligentes ICON com telemetria embarcada via GSM ou rádio, assim como soluções híbridas de conexão. O sistema VFD de movimento contínuo dos lances proporciona um avanço linear, configurando maior potencial de uniformidade e maior na lâmina de água, com menos esforço estrutural no equipamento (VALLEY IRRIGAÇÃO, 2021).

Por último, destaca-se plataforma Valley 365, lançada pela Valmont em 2019 e que tem como grandes vantagens a composição de quatro grandes pilares de trabalho na empresa, a Telemetria (Monitoramento e Controle), o Irriger Connect (Previsão e Planejamento), o Valley VRI (Otimização e Aplicação) e, por fim, o Valley Insights (Informações e Análises), uma nova etapa através de uma tecnologia disruptiva a ser embarcada nos pivôs de irrigação (VALLEY IRRIGAÇÃO, 2021).

A atuação do Brasil no cenário da sustentabilidade e da eficiência agrícola é estratégica e eficiente. Empresas e produtores nacionais exportam boas práticas e produtos altamente tecnificados para outros países. O grande desafio é que todos os setores envolvidos possam se unir em prol de um planejamento amplo para o setor.

2.5 Rede de distribuição

Enquanto solução para aumentar a rentabilidade e aproveitar melhor cada hectare de solo cultivado, o pivô é indiscutivelmente uma ferramenta eficaz. O desenvolvimento da irrigação é o caminho para a agricultura do futuro, e essa é uma demanda que vale a pena perseguir. Com base nisso as marcas estão trabalhando diariamente pela expansão da rede de revendedores em todo o território nacional, para que cada vez mais produtores tenham acesso aos benefícios do pivô central. Em especial, a Valmont está contemplando em 2021, 100 pontos de venda em todo o Brasil (VALLEY IRRIGAÇÃO, 2021).

De Norte a Sul, o estabelecimento de novos pontos de venda é fundamental para garantir a estrutura que o produtor precisa para irrigar com eficiência e segurança. Os

novos pontos de venda garantem acesso aos equipamentos a mais pessoas e suporte mais próximo aos que já utilizam o sistema.

Com a inauguração de cada unidade, aumenta também a equipe capacitada do fabricante, preparada para atender a todas as necessidades da região, o que significa a consolidação de uma verdadeira rede de irrigação que se estende por todo o Brasil, promovendo o desenvolvimento e o acesso à tecnologia mais avançada do mercado.

A rede de distribuição tem, além de outras, a função de ser a ponte entre o mercado e o fabricante; disseminando as novas soluções e tecnologia e trazendo os anseios do cliente para dentro das organizações. Estar próximo do cliente facilita a compreensão de sua necessidade e o oferecimento de soluções que garantam a ele ao resultado esperado.

O termo Sucesso do Cliente tem sido cada vez mais difundido dentro das organizações. Garantir que o cliente atinja as metas esperadas passa definitivamente pela ação da rede de distribuição, pois ela é, geralmente, o primeiro e o mais próximo contato com esse cliente. É a rede que auxilia diretamente o fabricante na leitura dessas necessidades e que, muitas vezes, sugere soluções simples e eficazes ainda não pensadas e não planejadas pela fábrica.

2.6 Governança

Um grande desafio a ser adotado por todas as empresas do Agronegócio, que virá também com o crescimento da agricultura irrigada brasileira, é a profissionalização, através da governança corporativa. A governança corporativa está relacionada ao alinhamento de interesses. Também tem como objetivo a preservação e a otimização do valor econômico de longo prazo na corporação, o que colabora para uma maior qualidade das tomadas de decisão.

A própria expressão governança corporativa conquista evidências e interesses de forma crescente dentro das organizações, sendo regida por conceitos fundamentais demonstrados a seguir: (i) transparência: divulgação das ações da empresa de forma clara e socialmente responsável, (ii) responsabilidade corporativa: a responsabilidade corporativa tem como pilar a valorização da sustentabilidade da corporação, visando a sua longevidade, (iii) equidade: o conceito de equidade está relacionado ao igual tratamento de todos os sócios e partes interessadas no negócio, e (iv) Prestação de contas: é a justificativa e a divulgação de dados que ocorrem quando os gestores da companhia revelam os resultados de seus atos, omissões e tomadas de decisões.

Um conceito que deverá crescer bastante nos próximos anos é o de ações voltadas à "ESG", sigla em inglês que significa a responsabilidade quanto ao meio ambiente, social e governança.

Por muito tempo, grandes empresas, organizações, governos e investidores consideraram principalmente os riscos denominados de "G" (governança), com foco em normas contábeis, adoção de novas práticas, formação e composição de conselhos de administração e éticas nos negócios. Porém, nos últimos anos, a influência da parte denominada "ES" (ambiental e social) vem aumentando consideravelmente e, com isso, exigindo uma nova postura das empresas.

2.7 Futuro responsável

A tecnologia contribui de forma efetiva para a democratização da agricultura irrigada, permitindo que cada vez mais produtores tenham acesso à irrigação por pivô central, com sistemas que se adaptam a diversos tipos de solo e topografia.

Duas considerações são importantes nesta análise de futuro responsável. Primeiramente, a expansão da agricultura irrigada em áreas já utilizadas na agropecuária (agricultura de sequeiro e pastagem) e, de outro lado, o uso de energia fotovoltaica em grande escala.

Um novo estudo de Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021) realizado pela Esalq/USP em parceria com a ANA e MDR, define o potencial de implantação de novas áreas irrigadas dentro do critério de intensificação em áreas aptas de agricultura de sequeiro (total de 73,9 milhões de ha) e de expansão em áreas de pastagem (total de 174,7 milhões de ha).

O estudo concluiu que, em números absolutos, 22% da área atualmente em uso com agricultura e pastagens no Brasil tem disponibilidade hídrica nos mananciais locais para crescimento da agricultura irrigada, totalizando 55,85 milhões de ha, sendo 26,69 e 26,73 milhões de ha, respectivamente sobre áreas com agricultura de sequeiro e áreas de pastagens. Cita ainda um adicional de 2,43 milhões de ha sobre áreas agropecuárias com água dos aquíferos (água subterrânea) e um potencial efetivo de curto e médio prazo de 13,7 milhões de ha que se concentram no Centro-Oeste (46%), Sul (31%), Sudeste (19%) e Nordeste e Norte com 2% cada um, correspondendo a 167% da área atual irrigada de 8,2 milhões de hectares.

Vale destacar que, considerando o crescimento médio dos últimos cinco anos de 215.000 ha/ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO, 2021), este potencial de 13,7 milhões de ha seria atingido somente em 2075, o que não parece adequado considerando-se os benefícios de uma agricultura irrigada sustentável para a produção de alimentos, empregos, renda e para o meio ambiente através da intensificação da produção. Uma proposta seria trabalhar de forma conjunta todos os setores envolvidos para atingir este potencial de 13,7 milhões de ha em 2050, ano em que estudos da FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2009) estimam a necessidade de aumento da produção de alimentos de pelo menos 60%. Tal meta exigiria, em média, dobrar a área atualmente implantada no país, atualmente de 215 mil ha, estando o setor industrial preparado para essa demanda ampliada.

Um importante avanço para as propriedades que se localizam em regiões mais isoladas, com limitação ao acesso à rede elétrica, que dificulta ou impede a instalação de equipamentos de irrigação, é o uso da energia fotovoltaica, que capta a energia solar e a converte em eletricidade para alimentar o pivô central.

Um bom exemplo são os pivôs equipados com painéis que captam a energia do sol e a armazenam em baterias. Dessa forma, o pivô pode irrigar nos momentos de disponibilidade de energia solar e ainda dispõe de reserva energética para ser utilizada em dias ou momentos com menos exposição à luz solar.

Essa nova realidade apresenta diversos benefícios, tanto para o produtor, quanto para o setor e a sociedade. Por um lado, ter mais produtores com acesso à tecnologia de irrigação significa mais produção de alimentos, contribuindo tanto para a renda dessas propriedades e famílias quanto para o agronegócio nacional. Por outro, há que se pensar no benefício da sustentabilidade e da economia de recursos.

2.8 Considerações finais

A energia solar é renovável, limpa e tem um baixo impacto ambiental, evitando, por exemplo, a emissão de dióxido de carbono, um dos principais gases do efeito estufa e, por consequência, um dos responsáveis pelo aquecimento global. As fontes mais

convencionais de energia, como combustíveis fósseis, são as que possuem o maior impacto ambiental, nesse sentido.

Além disso, o uso da energia solar também pode representar uma importante economia financeira para o produtor. Dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (SAUAIA, 2017), indicam que a economia dos sistemas fotovoltaicos é capaz de reduzir as contas de energia de forma significativa. Por tudo isto, o setor vem passando por um forte crescimento na última década no Brasil, com crescimento a uma taxa média anual de 230%.

Diversos números mostram o aumento da potência instalada em energia solar. Cerca de 7% do total de usinas instaladas estão localizadas em propriedades rurais brasileiras, correspondendo a 13,1% da potência instalada. Conforme dados da ANEEL, apenas no primeiro semestre de 2020 em zonas rurais, foram instalados 175 MW, um aumento significativo de 265% em relação ao mesmo período do ano anterior, indicando que, dentre as fontes renováveis de energia, a solar apresenta-se como uma solução mundial, tanto em relação ao meio ambiente quanto do ponto de vista econômico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR, 2021).

Frente a todo esse panorama, a grande questão é como desenvolver políticas de melhor aproveitamento da energia solar, fonte energética limpa, renovável, eficiente, abundante e acessível, para potencializar ainda mais a evolução tecnológica da agricultura irrigada?

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas de Irrigação**: uso da água na agricultura irrigada, v.2. Brasília: ANA, 2021, 86p.
- AGRONEGÓCIOS. Agricultura 5.0: Agricultura para alimentar um planeta em crescimento. Disponível em: <http://www.agronegocios.eu/noticias/agricultura-5-0-agricultura-para-alimentar-um-planeta-em-crescimento>. Acesso em: 21 mai. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. Absolar. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/deixeasolarcrescer>. Acesso em: 8 abr. 2021.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de Irrigação**. 9. Ed. Ed. UFV. 2019. 545p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTO. Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação (CSEI). Abimaq. Disponível em: <http://www.camaras.org.br/site.aspx/Home-CSEI>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- COLOMBO, A. Pivô central. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: Funep. Cap. 11, v.2, p.209-258. 2003.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Aquastat. Information system on water and agriculture. FAO, 2009. Disponível em: www.fao.org/nr/aquastat/. Acesso em: 18 mar. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. 2009. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Acesso em: 6 abr. 2021.
- GUIMARÃES, D.P.; LANDAU, E.C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil**: ano base 2020. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 63p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário Brasileiro de 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/>. Acesso em: 7 abr. 2021.
- IRRIGER. **Gestão da Irrigação**. 2021. Disponível em: <http://www.irriger.com.br/pt-br>. Acesso em: 8 abr. 2021.

LIVING HISTORY FARM. 2021. Disponível em: <https://livinghistoryfarm.org/farminginthe50s/water/first-pivots-installed/>. Acesso em: 5 abr. 2021.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação princípios e métodos**. Ed. UFV, 2009. 355p.

SAUAIA, R.L. Energia soar fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios. ABSOLAR. Seminário Desafios da Geração de Energia Elétrica no Brasil. Brasília. 2017. 30p.

VALLEY IRRIGAÇÃO. Sistema Valley 365. 2021. Disponível em: <http://www.valleyirrigation.com.br/precision-ag/valley-365>. Acesso em: 5 abr. 2021.

VALLEY. História da irrigação e dos 48 anos da Valmont no Brasil. Informe Técnico Publicitário. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.54, p.37-39. 2002.

CAPÍTULO 3

3 IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO: HISTÓRICO E EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Marcus Henrique Tessler

Resumo

Desenvolvida em Israel, a partir dos anos 60, a irrigação por gotejamento vem se expandindo rapidamente em todo o mundo. Amplamente utilizada em frutas e hortaliças, o gotejamento vem sendo aplicado cada vez mais em cultivos como cafeicultura, cana de açúcar, citricultura, oliveiras, nogueiras, seringueiras, etc. e mais recentemente em grãos e arroz, nos sistemas enterrados. A expansão acelerada se deve entre outros às grandes produtividades associadas ao gotejamento assim como a alta eficiência de aplicação da água e fertilizantes. O artigo abaixo resume o desenvolvimento dessa tecnologia nos últimos anos e oferece brevemente uma visão agrônômica das principais características de se trabalhar com gotejamento, entre elas a fertirrigação / quimigação. A necessidade de se produzir cada vez mais alimentos a uma população global crescente, associado a necessidade de se utilizar cada vez menos água na produção agrícola, faz com que a alternativa de se utilizar o gotejamento seja cada vez mais procurada. O conceito de se produzir "mais com menos" é parte intrínseca da tecnologia da irrigação por gotejamento e explica o crescimento acelerado dessa técnica no mundo e no Brasil.

3.1 Introdução

A tecnologia do sistema irrigação por gotejamento se originou em Israel, nos anos 60, e foi fruto de um acaso, como muitas vezes ocorre com as grandes descobertas.

Um engenheiro de nome Simcha Blass, diretor do departamento de águas no Sul de Israel, a caminho de seu escritório, observou que várias árvores, plantadas em uma região árida, permaneciam permanentemente verdes e crescendo durante todo o ano. Após abrir uma pequena trincheira no local, observou de que a linha adutora que levava água para o bairro vizinho, e que passava justamente ao lado das árvores, apresentava um pequeno vazamento. A observação de que um vazamento insignificante e contínuo de água podia sustentar árvores de porte no meio de um deserto levou, alguns anos depois, ao desenvolvimento do primeiro gotejador e aos primórdios da tecnologia de irrigação por gotejamento.

Alguns anos após essa observação inicial, o Engenheiro Blass já aposentado, desenvolveu o que é conhecido com o primeiro protótipo de um gotejador comercial. A ideia muito simples, consistia em abrir um pequeno orifício em um tubo de polietileno, e envolvê-lo com um micro tubo conectado a esse orifício, por onde a água perdesse pressão à medida em que avançava pelo micro tubo, e finalmente saía em forma de gotas.

A ideia, e o conceito de se irrigar com baixos volumes de água e através de gotejadores, foi vendida posteriormente a uma das cooperativas locais (kibbutz) com a intenção inicial de irrigar seus próprios cultivos. À medida em que os primeiros problemas técnicos foram sendo superados, a técnica da irrigação por gotejamento começa a se desenvolver e a se expandir localmente. O kibbutz Hatzerim, que havia se

associado e comprado a ideia original do eng. Blass, cria a primeira empresa de irrigação por gotejamento no mundo, a Netafim. Desde então o desenvolvimento dessa tecnologia não para de crescer.



Figura 1. Evolução histórica dos gotejadores.

Os primeiros resultados e avanços indicaram que a tecnologia necessitava de muitas melhorias e ajustes, em especial no que se referia ao desenvolvimento dos gotejadores e dos sistemas de filtragem adequados, requeridos para proteger o sistema contra entupimentos e obstruções.

A tecnologia de irrigação por gotejamento esteve limitada a Israel até que novos gotejadores e acessórios para complementar os sistemas foram sendo aprimorados (filtros e válvulas), a finalmente o conceito de irrigação por gotejamento como um sistema novo e revolucionário começa a se expandir.

A partir da segunda metade dos anos 70, com o desenvolvimento de gotejadores mais sofisticados e confiáveis, e da compreensão do potencial desses sistemas no aumento das produções e na qualidade final dos produtos irrigados, a tecnologia de irrigação por gotejo sai de Israel em direção a outros países do mundo, inicialmente sendo aplicado àqueles onde as áreas desérticas eram significativas (Estados Unidos, México, África do Sul, Austrália). No entanto, somente a partir dos anos 80 é que a tecnologia da irrigação por gotejamento se populariza e ganha adeptos em todo o mundo, tornando-se a opção técnica mais atrativa para um grande número de cultivos, em especial a fruticultura, cotonicultura, citricultura, hortaliças, entre outros.

Ainda que o gotejamento se originou em Israel e as empresas israelenses continuam liderando o desenvolvimento dessa tecnologia, empresas de outros países já têm uma participação importante no crescimento do gotejamento em todo o mundo. Entre elas estão as empresas indianas, americanas, italianas, gregas, espanholas, coreanas, chinesas, entre tantas outras. O mercado é crescente e novas aplicações aparecem a cada dia.

A irrigação por gotejamento chega ao Brasil em torno de 1983, trazido por empresas que importavam tecnologia israelense ao País, mas é a partir da segunda metade dos anos 90, com a recente abertura comercial do país, as empresas israelenses começam a se instalar formalmente no Brasil. Após o ano 2000, inicia-se a produção local de seus produtos, difundindo de forma definitiva a tecnologia.

A intenção desse artigo é o de dar uma ideia atualizada da tecnologia da irrigação por gotejamento no mundo, e em especial no Brasil. O caráter prático desse material em nenhum momento significa uma abordagem superficial dos temas a serem tratados. Pelo contrário, as análises estão muito bem fundamentadas em conhecimentos sólidos da moderna teoria de irrigação. A ótica abordada é a do engenheiro de campo, preocupado com os aspectos técnicos que envolvem um bom projeto e um bom manejo do sistema, sem, no entanto, perder de vista de que o que realmente interessa é o resultado agrônômico e econômico para o agricultor.

Um bom agro projeto começa nos estudos básicos de solo, água, topografia e clima. As práticas agrônômicas e culturais de cada região devem ser incorporadas ao projeto, sempre que possível. O agro-projeto, é baseado em satisfazer as necessidades hídricas e nutricionais da cultura implantada. Deve-se levar em conta aspectos científicos, agrônômicos, operacionais e econômicos para a concepção de um bom projeto de irrigação. Além disso um bom dimensionamento da injeção de fertilizantes (fertirrigação) também é fator chave de sucesso em um projeto, uma vez que essa técnica exige critérios desde seu dimensionamento até sua aplicação.

A combinação da boa engenharia de irrigação aliado ao manejo correto do sistema traz ótimos resultados. O entendimento perfeito de quando e quanto irrigar, é um dos fatores fundamentais para que altas produtividades sejam obtidas. Para tanto é necessário que os dados básicos de física de solos (granulometria, capacidade de retenção de água, tipo de solo, entre outros) sejam incorporados à metodologia de cálculo, de modo a definir com critérios técnicos o momento correto de se irrigar os vários cultivos e o tempo ou volume de água necessário para que o solo volte a condições ótimas de umidade, permitindo um crescimento ideal para as plantas.

3.2 Desenvolvimento tecnológico dos gotejadores

3.2.1 Características do sistema

A irrigação por gotejamento é um sistema de engenharia novo, um conceito distinto de como a irrigação era feita até poucos anos atrás.

No gotejo, a água é filtrada e levada até a região onde se localiza o sistema radicular dos cultivos através de uma malha hidráulica composta de tubulações adutoras, secundárias e ramais, e aplicada exatamente nesse ponto com grande precisão, através de emissores (gotejadores) com vazão conhecida. Muitas vezes o termo irrigação por gotejamento é confundido com irrigação localizada, que abrange também os sistemas de micro aspersão.

Um sistema de gotejamento é composto de vários componentes (Figura 2), que podem ser divididos entre: (i) conjunto moto-bomba e chave de partida, (ii) filtragem, (iii) sistema de automação e controle, (iv) injeção de fertilizantes, (v) rede adutora (principal) e linhas de distribuição (ramais), (vi) válvulas, (vii) tubulação gotejadora, e (viii) medidor de água.

Embora o sistema funcione como um todo, a ênfase nesse capítulo é a de apresentar o desenvolvimento da tecnologia dos emissores (gotejadores) e como isso

tem impactado o crescimento da irrigação por gotejamento como um todo.

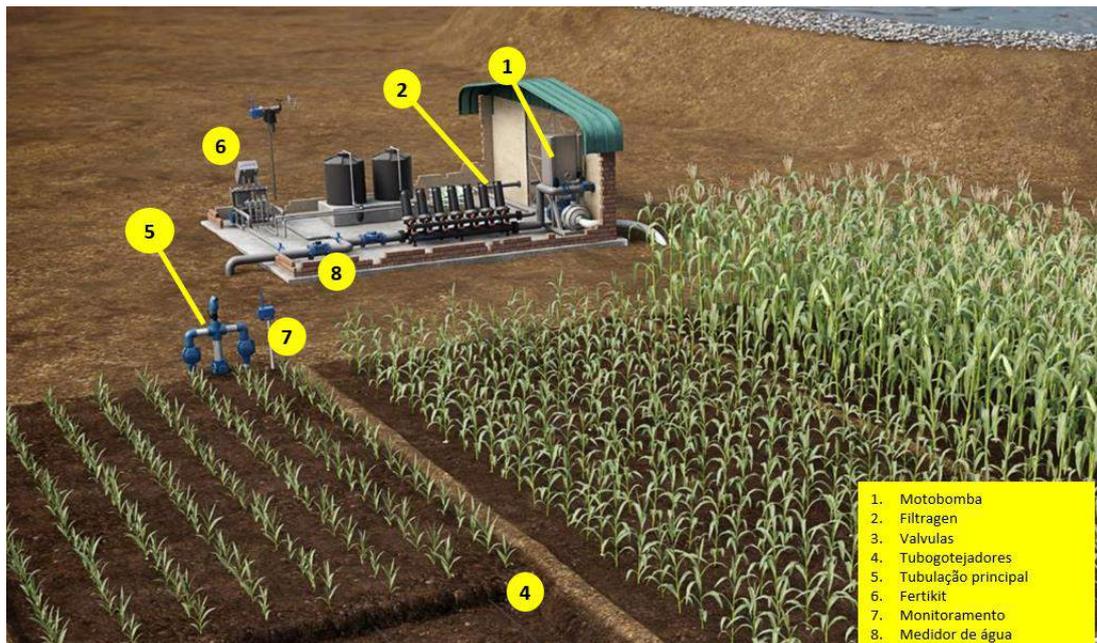


Figura 2. Vista de um sistema de irrigação por gotejamento típico.

3.3 Gotejadores

Os equipamentos de irrigação por gotejamento vêm se desenvolvendo muito nos últimos 60 anos, tornando-se cada vez mais confiáveis e duráveis.

Considere uma mangueira de polietileno com água escoando sob pressão. Ao se abrir um pequeno furo nessa mangueira a água vai jorrar, e quanto maior a pressão nesse ponto mais água vai espirrar através desse orifício. À medida em que a água percorre a mangueira ocorre uma perda de pressão por atrito entre a água e a parede da tubulação; esse fenômeno é conhecido pelos engenheiros como perda de carga. Em uma topografia plana a pressão existente no início da linha é maior do que aquela existente no final da linha e conseqüentemente uma quantidade maior de água jorra em um orifício no início da linha do que em um orifício similar no final.

Um gotejador é uma peça projetada de forma que, se inserida numa mangueira sob pressão, vai liberar através da saída do emissor uma quantidade de água com vazão conhecida e pré-determinada. Para evitar que a água jorre através de um gotejador localizado na tubulação, desenvolveu-se um mecanismo que induz uma perda de pressão (perda de carga) significativa à medida que a água passa através dessa peça. Assim, ainda que a pressão da água seja grande, ao passar através do gotejador ela se dissipa, e sai com pressão praticamente zero, sob a forma de gotas.

Nos primeiros gotejadores comerciais (anos 60 e princípio dos anos 70), o caminho em que a água percorria dentro do gotejador para dissipar energia (perder carga ou pressão) era um caminho helicoidal e muito longo, além do que a água fluía através de uma área de seção transversal pequena. A velocidade da água dentro do gotejador não era grande, o que muitas vezes acarretava problemas de funcionamento, em especial aqueles relativos a obstruções ou entupimentos. Em termos de engenharia, o fluxo nessas condições é conhecido como fluxo laminar.

A partir dos anos 70, desenvolveu-se um novo tipo de gotejador, onde o caminho interno percorrido é tortuoso e muito menor do que o apresentado no modelo anterior. Além disso possuía uma área de seção transversal interna maior, e com grande

velocidade de escoamento de água. Esse gotejador, muito menos sujeito a entupimentos, tornava os sistemas de gotejamento mais confiáveis, mesmo sob regime de fertirrigação e/ou utilizando-se águas de baixa qualidade. Essa nova tecnologia incorpora hidraulicamente um fluxo turbulento no gotejador.

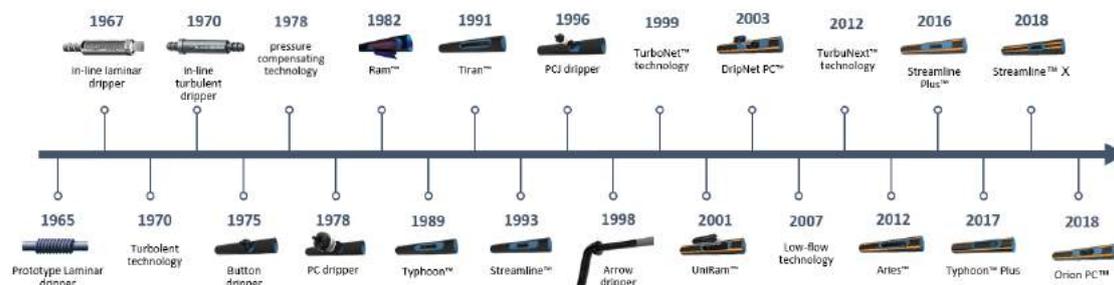


Figura 3. Evolução histórica do desenvolvimento de emissores Netfim.

O caminho que a água percorre dentro do gotejador para perder energia é conhecido como o labirinto do gotejador, ou apenas labirinto (Figura 4). Ainda que o desenho, dimensões e forma do mesmo tenham se modificado significativamente nos últimos anos, todos os gotejadores modernos possuem esse sistema para induzir perda de carga.



Figura 4. Vista de um sistema de labirinto de um gotejador.

Até meados dos anos 70, os gotejadores eram externos à tubulação e inseridos mecanicamente no processo de fabricação. Em 1975 se desenvolveu os primeiros gotejadores tipo botão, que são comuns até os dias de hoje, muito utilizados em viveiros e estufas (Figura 5).

Esses gotejadores, tanto os conhecidos como "in line" até os gotejadores tipo botão (*on line*), apresentavam a mesma característica de serem dependentes da pressão. Para um mesmo gotejador, se a pressão na linha varia de um ponto a outro, a vazão do gotejador muda de acordo com essa variação. Dessa forma, para que o sistema aplique água de uma maneira uniforme é necessário que o projetista fixe limites máximos de variação para a pressão, e conseqüentemente à vazão correspondente, uma vez que o conceito de uniformidade é fundamental em irrigação por gotejo.

A partir do fim dos anos 70, incorporou-se mais um avanço tecnológico no

desenvolvimento dos gotejadores. No mesmo gotejador de fluxo turbulento desenvolvido anteriormente, incorporou-se uma membrana de borracha ou silicone no corpo do gotejador (Figura 6). Essa membrana, chamada de diafragma, se ajusta dentro do gotejador, dependendo da pressão. Se a pressão é grande, ao se ajustar, o diafragma impede o caminho natural da água forçando uma perda de carga maior dentro do gotejador. Consequentemente, a vazão diminui. Da mesma forma, se a pressão é pequena, o ajuste do diafragma é reduzido ou inexistente, e a passagem de água através do gotejador aumenta, acarretando uma vazão maior.



Figura 5. Gotejador tipo botão.

O diafragma incorporado exerce uma "regulagem" da pressão dentro do gotejador, fazendo com que, independentemente da pressão externa (pressão da linha) a vazão que cada gotejador vai fornecer seja sempre a mesma. Essa característica permite uma uniformidade de aplicação de água muito alta, dependendo apenas do gotejador. Em outras palavras, quando utilizado esse tipo de equipamento, a quantidade de água e fertilizantes aplicado pelo sistema é igual em todo o campo, independente de topografia, comprimento da tubulação gotejadora, pressão na rede, entre outros.

Esse tipo de gotejador é conhecido como auto compensável e foi considerado um dos avanços tecnológicos mais importantes no desenvolvimento dos sistemas de gotejamento. Ao mesmo tempo que se desenvolveu esse gotejador, incorporou-se também um mecanismo de autolimpeza nesses gotejadores.

Se alguma partícula ou impureza passar através dos filtros, penetrar o gotejador e chegar a bloqueá-lo, a membrana de regulação de pressão (diafragma) abre totalmente, permitindo que a passagem de água naquele instante seja a máxima. Nessas condições, o fluxo de água dentro do gotejador aumenta e elimina consigo a sujeira. Assim, além de se desenvolver um mecanismo de auto compensação, incorporou-se no mesmo um sistema de autolimpeza.

No início dos anos 80, um novo gotejador foi desenvolvido, incorporando toda tecnologia de auto compensação e auto limpeza. O avanço significativo foi a introdução de tubulações onde os gotejadores foram incorporados na tubulação durante o processo de fabricação da mangueira. Essa tubulação, com gotejadores integrados, é comumente chamada de tubo gotejador, como pode ser visto na Figura 7.



Figura 6. Gotejador auto compensado.



Figura 7. Gotejador auto compensado *in line*.

Nesse caso, a vazão e o espaçamento dos gotejadores são definidos pelo projetista, de acordo com os dados agrônômicos (cultura e solo) e a tubulação é fabricada de acordo com as especificações solicitadas. A vantagem desse equipamento é a redução de problemas de vandalismo, comuns quando na utilização de gotejadores de botão, aliado à praticidade de se estender e recolher essa tubulação no campo.

A partir dos anos 90, a tecnologia de fabricação dos gotejadores permite duas alternativas: gotejadores autocompensados ou regulares, sejam de botões (externos) ou integrais (internos). E é justamente a partir de década de 90 e início do ano 2000 que o conceito da irrigação por gotejamento começa a se expandir fortemente em todo o mundo.

O desenvolvimento dos gotejadores continua, em especial no que diz respeito ao desenho de novos labirintos internos, garantindo uma performance ainda mais eficiente. Esses mesmos gotejadores vêm acompanhados de um pré-filtro, de modo a otimizar ainda mais as questões ligadas a obstruções.

Novos produtos vão sendo desenvolvidos constantemente, para aplicações especiais. Entre eles os gotejadores tipo flecha, para aplicações em viveiros, os gotejadores com mecanismos anti-sucção para trabalhar com sistemas de gotejo enterrado, gotejadores com produtos inibidores de intrusão de raízes, gotejadores

antidrenantes ou ainda aqueles desenvolvidos para aplicação em mineração (lixiviação de ouro e cobre), entre outros. A tecnologia avança.

De forma sucinta os gotejadores modernos incorporam uma série de parâmetros técnicos e de engenharia, que os tornam muito mais resistentes e adaptados a toda e qualquer situação de campo. É de se esperar que os gotejadores atuais tenham algumas das características apresentadas abaixo: (i) regime de fluxo interno turbulento, (ii) grande seção transversal interna, por onde a água escoar (que possam eliminar as impurezas que eventualmente venham e penetrar no gotejador), (iii) possuam uma área grande de pré-filtragem, (iv) labirinto de comprimento pequeno, para que a água entra e saia do gotejador rapidamente, (v) mecanismos de auto compensação e auto limpeza, (vi) vida útil longa, (vii) possam operar com águas de baixa qualidade, (viii) possuam mecanismos de ante sucção, (ix) possuam mecanismos ante drenante, e (x) outros.

Cada aplicação requer um tipo de solução. Entre outros parâmetros, a escolha do gotejador (ou tubo gotejador) ideal é uma combinação de vários fatores, e vai depender da experiência dos técnicos e projetistas para definir a solução mais apropriada.

3.4 Vazão dos gotejadores

A vazão dos gotejadores tem mudado significativamente nos últimos anos. Com o desenvolvimento da tecnologia e do conhecimento agrônomo associado à irrigação por gotejamento, observa-se uma tendência de se utilizar a cada dia, gotejadores de vazões menores.

Do ponto de vista agrônomo, a distribuição da água em torno do gotejador tende a ser maior lateralmente, quando se utilizam vazões menores, uma vez que a água vai se distribuindo mais lentamente no solo. Do ponto de vista agrônomo, a taxa de aplicação de um sistema com essas características é menor, permitindo repor lentamente ao cultivo o que está sendo consumido pela evapotranspiração. E finalmente, ao aplicar água de forma mais lenta, se minimiza o potencial de perdas por lixiviação.

A utilização de gotejadores com vazões menores tem um impacto muito grande na engenharia, permitindo linhas longas para a tubulação gotejadora, menor infraestrutura de rede hidráulica, simplificando a instalação dos sistemas e reduzindo também as questões de automatização.

A utilização de gotejadores de vazão menor só está sendo possível devido ao desenvolvimento tecnológico dos emissores apresentados anteriormente. Até poucos anos atrás era comum projetar sistemas com gotejadores de 8,0 L h⁻¹, 4,0 L h⁻¹, 3,6 L h⁻¹, entre outros. A tendência atual é a de se trabalhar com gotejadores de 1,6 L h⁻¹, 1,0 L h⁻¹ e 0,6 L h⁻¹.

3.5 Princípios da irrigação por gotejamento (Engenharia e Agronomia)

3.5.1 Engenharia: parâmetros de projeto

Dentre os parâmetros necessários para a elaboração de um projeto de irrigação por gotejo estão: (i) qualidade da água, (ii) tipo de solo, (iii) evapotranspiração, (iv) coeficiente de cultivo, (v) levantamento planialtimétrico, (vi) outras informações técnicas e (vii) projeto hidráulico.

3.5.1.1 Qualidade de água

Uma análise completa da qualidade da água deve ser feita para avaliar problemas potenciais em relação a possíveis entupimentos dos gotejadores. A partir dessa análise determina-se uma estratégia de pré-tratamento da água, aeração, oxidação (cloração ou peróxido de hidrogênio), injeção de ácidos, ou uma combinação dessas alternativas, de modo a prevenir problemas potenciais.

As Tabelas 1 e 2 indicam os principais elementos que devem ser analisados, suas concentrações, e o maior ou menor grau de risco de problemas futuros.

Tabela 1. Critério indicativo de qualidade de água quanto ao risco de entupimento de gotejadores (NAKAYAMA; BUCKS, 1986).

Fator	Risco de entupimento		
	Pequeno	Moderado	Severo
Físico			
Sólidos em suspensão (mg L ⁻¹)	50	50 – 100	> 100
Químico			
pH	7,0	7,0 – 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)	500	500 - 2.000	> 2.000
Manganês (mg L ⁻¹)	0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Ferro total (mg L ⁻¹)	0,2	0,2 – 1,5	> 1,5
Sulfito de hidrogênio (mg L ⁻¹)	0,2	0,2 – 2,0	> 2,0
Biológico			
Número total de bactérias ¹	10.000	10.000 – 50.000	> 50.000

¹ Número máximo por mL.

Tabela 2. Principais fatores físicos, químicos e biológicos que contribuem para o entupimento de sistemas de gotejamento (NAKAYAMA; BUCKS, 1986).

Físicos (sólidos em suspensão)	Químicos (precipitação)	Biológicos (bactéria e algas)
Partículas inorgânicas Areia Silte Argila Plástico	Carbonato de cálcio ou magnésio Sulfato de cálcio	Filamentos Decomposição microbiológica: ferro, manganês, enxofre
Partículas orgânicas	Metais pesados, carbonatos, silicatos e sulfitos	
Plantas aquáticas (phytoplankton / algas)	Óleo e outros lubrificantes	
Animais aquáticos (zooplâncton)	Fertilizantes: fosfatos, ferro, cobre, zinco, manganês	
Bactéria		

A análise da qualidade de água, as maneiras de prevenção do problema (aeração, cloração, outros) assim como sugestões de remediação de problemas existentes (limpeza com ácidos, injeção de cloro, concentrações e tempo de aplicação de produtos químicos) devem ser analisados por profissionais experientes na área de irrigação localizada.

É sempre mais fácil prevenir os problemas com antecedência do que remediá-los.

3.5.1.2 Tipo de solo

A textura do solo é um dos parâmetros mais importantes para a execução do projeto, uma vez que define, entre outros, o espaçamento a ser escolhido para os gotejadores.

O efeito de um gotejador no solo é a formação de um volume molhado, tridimensional, de tamanho e forma variável, denominado bulbo molhado. A superposição dos bulbos formados por cada gotejador individual forma uma faixa molhada contínua no solo, onde o sistema radicular vai se desenvolver. Em geral se espera que haja continuidade nessa faixa.

Considerando-se a mesma quantidade de água total aplicada, a forma do bulbo em solos arenosos lembra a de uma cenoura, longa e estreita. Para que a faixa molhada seja contínua é necessário portanto que os gotejadores estejam próximos entre si. No caso de solos argilosos, a forma do bulbo se assemelha mais à de uma cebola, mais arredondado e menos profundo. Assim, para esses solos, opta-se por gotejadores mais distantes um do outro. A Figura 8 apresenta o formato do bulbo molhado em três tipos de solo.

A razão para esse fenômeno é a de que em solos arenosos a força preponderante atuando na água é a da gravidade, forçando a mesma para baixo. Em solos argilosos, embora a força da gravidade também esteja presente, as forças capilares (atração entre a argila e a água) são grandes, fazendo com que a água tenha um movimento lateral significativo.

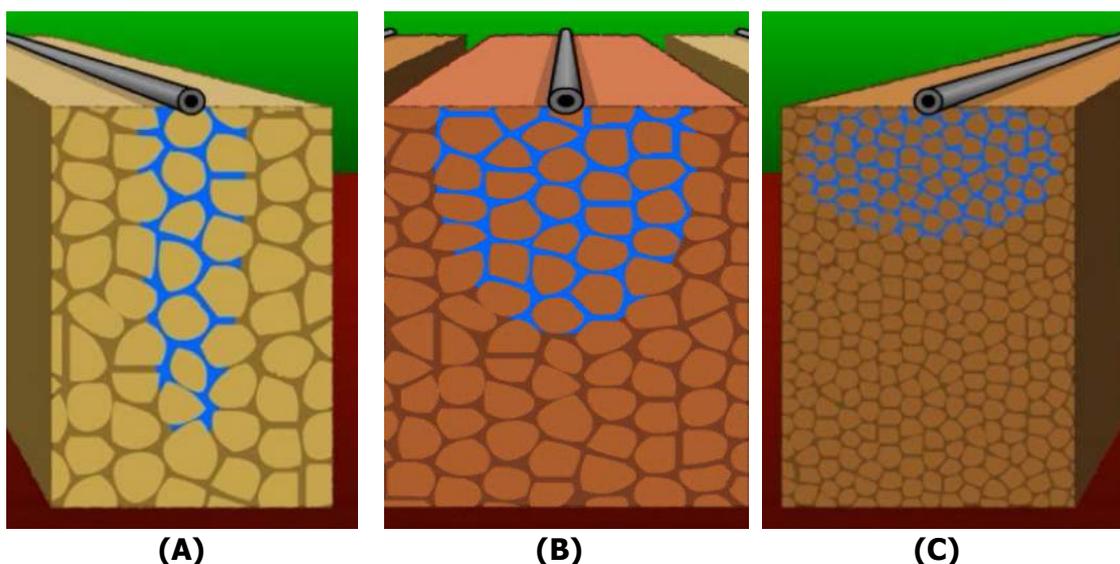


Figura 8. Bulbo molhado em diferentes tipos de solos: (A) solo argiloso, (B) solo médio e (C) solo arenoso.

3.5.1.3 Evapotranspiração

A quantidade de água que um sistema de irrigação deve fornecer é função direta da quantidade de água consumida pelas plantas. A soma da quantidade de água evaporada da superfície do solo com aquela consumida pelo processo de transpiração das plantas é conhecida como evapotranspiração.

A evapotranspiração de um determinado cultivo depende das condições climáticas e locais existentes na região, além de fatores genéticos (intrínsecos a cultura em estudo). Exemplificando, para um mesmo local, o consumo de água de uma lavoura de café é totalmente distinto do consumo de água de uma lavoura de banana, já que diferentes cultivos apresentam diferentes consumos de água, devido a fatores genéticos. Entre outros, os fatores mais importantes que determinam a evapotranspiração para um determinado local são a temperatura, a umidade relativa do ar, a velocidade dos ventos, a altitude, a latitude, e a radiação solar.

A determinação da evapotranspiração para uma determinada região é fruto de inúmeros estudos e pesquisas, e interessam a todos envolvidos em problemas de engenharia de meio ambiente, recursos hídricos, clima, e não será abordada nesse artigo. Para todos os efeitos e fins de projeto, parte-se do princípio de que esses valores são conhecidos na região em questão. Esses dados podem ser obtidos e/ou estimados através de relatórios de Universidades locais, centros de pesquisa, órgãos governamentais, entre outros.

3.5.1.4 Coeficiente de cultivo

Após o conhecimento da evapotranspiração é necessário se conhecer o coeficiente de cultivo (K_c) da cultura em questão.

Com os dados da evapotranspiração aliados ao K_c , chegamos a um fator chamado de Evapotranspiração da Cultura, que indica a demanda de água requerida já adaptada a cultura que irá ser implantada no projeto.

3.5.1.5 Levantamento planialtimétrico

Um levantamento planialtimétrico detalhado deve ser apresentado para que o projeto possa ser executado. Nesse levantamento devem constar o ponto e a cota de captação da água, todos os acidentes topográficos (brejos, árvores de porte, áreas de preservação) e os elementos feitos pelo homem (estradas, carreadores, cercas, etc.). Devem ser apresentadas curvas de nível a cada 2 m (para terrenos acidentados) até a cada 5m para terrenos mais suaves.

Direções preferenciais de plantio devem ser incorporados no levantamento (se em curva de nível ou outra direção) assim como qualquer mudança no sentido do plantio dentro da lavoura.

3.5.1.6 Outras informações técnicas

Resta ainda acrescentar dados sobre o cultivo, em especial o espaçamento de plantio. Se espaçamentos diferentes estão sendo utilizados, devem ser indicados com clareza no mapa topográfico.

A disponibilidade ou não de energia elétrica no local, voltagem da rede, restrições de água, vazão máxima disponível são algumas das informações técnicas que devem ser indicados.

3.5.1.7 Projeto hidráulico

De posse de todos os dados preliminares para a execução do projeto, o primeiro passo é a escolha do equipamento.

O princípio fundamental de um projeto de gotejamento é o de que o cultivo seja irrigado da maneira mais uniforme possível. Em toda a lavoura a quantidade de água e fertilizantes aplicada tem que ser praticamente a mesma, independente se a cultura se encontra perto ou não da captação da água, se está ao lado do carreador ou em uma rua morta, se em um ponto alto do campo ou numa baixada.

Qualquer que seja a situação todo o cultivo deve receber a mesma quantidade de solução nutritiva. Para tanto, o engenheiro avalia os parâmetros de projeto e a topografia, e opta por um tipo específico de equipamento. Essa avaliação é feita em parceria com o agricultor, uma vez que as diferentes opções técnicas acarretam custos distintos.

O projeto hidráulico de um sistema de irrigação por gotejamento se inicia na adequação do tipo de gotejador e o espaçamento entre os gotejadores ao tipo de solo onde o cultivo está plantado. Para se determinar precisamente esses valores pode-se proceder a testes no campo e averiguar se a escolha dos mesmos foi apropriada. Em alguns casos um engenheiro experiente define esses parâmetros *a priori*, sem a necessidade de testes.

O espaçamento entre gotejadores não tem nenhuma relação com o espaçamento da cultura a ser irrigada. A combinação do tipo de solo, vazão e distância entre os gotejadores é o que define a solução técnica do projeto, e não o espaçamento do cultivo em si.

Em sistemas de gotejamento com gotejadores regulares (onde a vazão de um gotejador depende da pressão), há que estabelecer critérios de engenharia para assegurar um alto grau de uniformidade. Normalmente, se define que nesses casos um bom projeto tenha uma variação máxima de vazão entre os gotejadores de 10%. Com esse critério se assume que a uniformidade do sistema é alta e não deve afetar o resultado agrônômico.

Para variações maiores do que 10%, a desuniformidade aumenta e conseqüentemente a diferença entre a vazão dos primeiros e dos últimos emissores nas linhas laterais de irrigação será grande. Essa situação pode influir na produção, criando áreas mais produtivas do que outras. Isso é especialmente observado em cultivos perenes, onde ano após ano parte da lavoura é "mais irrigada e fertilizada" do que outras.

De forma ilustrativa (Figura 9) para se conseguir uma variação máxima de vazão de 10%, o projetista deve restringir a variação máxima de pressão dentro de um determinado setor, dependendo do gotejador.

Sistemas que utilizam tubulações com gotejadores autocompensáveis se caracterizam por uma alta uniformidade de aplicação. Todos os gotejadores aplicam a mesma quantidade de água e nutrientes e em geral essa uniformidade é refletida na lavoura, com crescimento das plantas e produção muito similar em toda a área.

A alta uniformidade de aplicação acaba se refletindo nos cultivos, com uma produção homogênea e de alta produtividade.

O dimensionamento hidráulico de um projeto de irrigação por gotejo prevê a aplicação de um volume total de água (lâmina) para o cultivo, suficiente para repor toda a água consumida via evapotranspiração naquele dia. O sistema é calculado para que o

fornecimento de água seja o necessário para repor essas perdas no caso de uma lavoura adulta, no pico de demanda, produzindo no seu potencial.

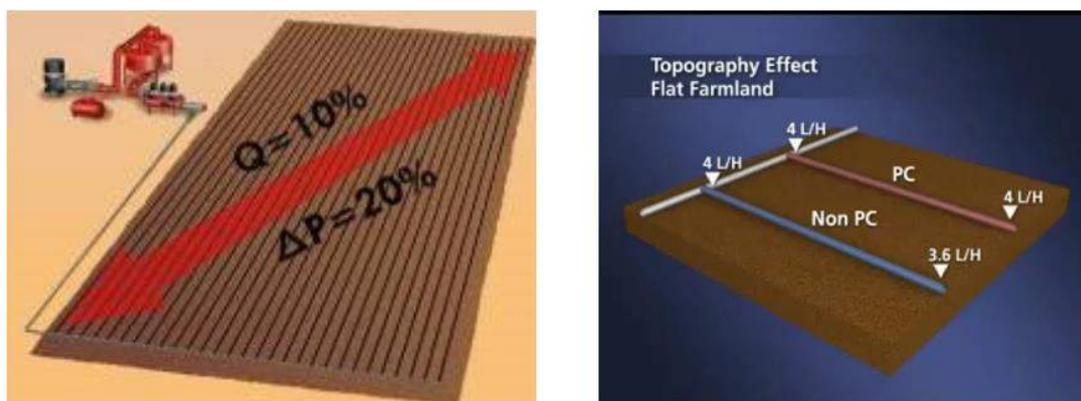


Figura 9. Variação máxima de vazão em projetos com gotejadores regulares.



Figura 10. Vista de uma área de cafeicultura irrigada.

3.5.2 Agronomia: princípios de operação na irrigação por gotejamento

Sistemas de irrigação por gotejamento devem ser operados de modo a aplicar água com alta frequência e com pequenas quantidades de água a cada aplicação. Dependendo do tipo de solo, é possível que a aplicação de água seja diária, ou até em casos mais críticos, duas a três vezes ao dia (solos extremamente arenosos). Diferentemente de outros sistemas, o sistema de gotejo é fixo no campo e pode ser acionado ou desligado sem qualquer custo adicional.

3.6 Conceito do solo como reservatório

Para fins de manejo de uma cultura irrigada considere o conceito clássico do solo como um reservatório. Os limites de água nessa "caixa d'água" são indicados a seguir,

e o princípio ideal de manejo é “encher a caixa” com uma frequência determinada, sem deixar que o nível baixe a valores críticos, a partir do qual a produção poderia ser afetada. Os parâmetros clássicos necessários para se definir quando irrigar e quanto irrigar são: (i) capacidade de campo (CC): é definido como o teor de umidade que o solo se encontra depois de 24 a 48 horas após chuvas ou irrigação terem ocorrido, isto é, depois de que o excesso de água tenha sido drenado do solo. Pode ser interpretado como o teor de umidade ótimo para o crescimento das plantas. Quando o solo se encontra em capacidade de campo, a umidade e a aeração do solo são adequadas, e as plantas encontram as melhores condições para o crescimento. É o nível ideal de água no reservatório, (ii) ponto de murcha permanente (PMP): é o teor de água em que o solo se encontra a partir do qual as plantas deixam de ser capazes de extrair água do solo, e entram em declínio. Fisicamente, a partir desse limite, as plantas já não são capazes de recuperar sua turgidez. O ponto de murcha permanente é o limite mínimo que o reservatório pode chegar, (iii) disponibilidade total de água (DTA): é a quantidade total de água liberada pelo solo entre os limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente ($DTA = CC - PMP$). Representa o volume de água disponível por unidade do volume total de água no reservatório, (iv) limite de disponibilidade (f): representa o limite máximo entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente a partir do qual volta-se a irrigar uma determinada cultura. Em geral é expresso em porcentagem (%). Em termos práticos significa o nível do reservatório onde se restabelece a irrigação, e em geral é muito acima do limite mínimo (ponto de murcha permanente), e (iv) disponibilidade real de água (DRA): é a quantidade máxima de água à disposição das plantas antes de se reiniciar a irrigação. Representa o volume máximo disponível para as plantas antes de se irrigar novamente, e é o volume que se considera para manejar o sistema, e é expresso como $DRA = f \times DTA$ (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

A Figura 11 mostra esquematicamente a quantidade de água e ar em um determinado solo para os parâmetros discutidos anteriormente.

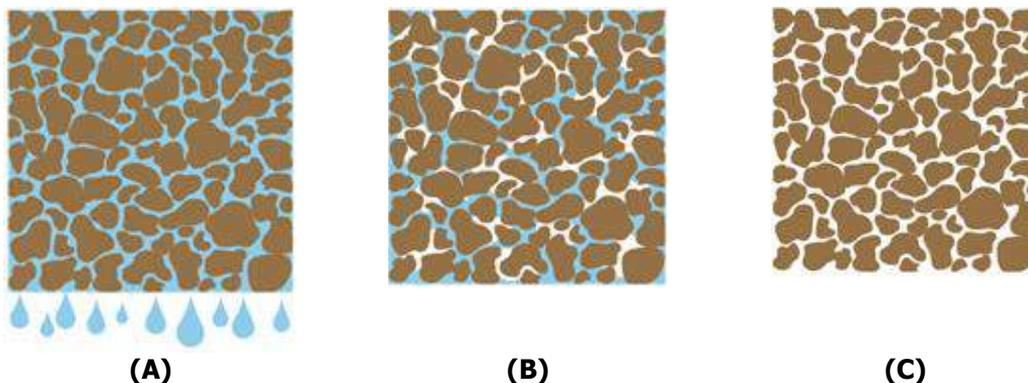


Figura 11. Diferentes estados de teor de água no solo (A) ponto de saturação, (B) capacidade de campo e (C) ponto de murcha permanente (água disponível).

O conceito do solo como um reservatório é muito utilizado na aspersão e em sistemas de sulcos e/ou superfície, na sua estratégia de manejo da água. Uma vez que no gotejamento pode-se irrigar com alta frequência sem custo operacional adicional associado a esse sistema, a ideia de um solo como reservatório não é tão representativa.

Quando se irriga uma cultura por gotejamento, pretende-se estabelecer um regime de irrigação de modo que o solo esteja sempre perto da condição de capacidade de campo (condição ótima). Se isso ocorre, o movimento de absorção de água pelas plantas é grande, e os benefícios em forma de produção aparecem. Se o nível de umidade do solo baixar muito, se aproximando daqueles valores próximos ao ponto de

murcha permanente, a produção será definitivamente afetada. Para se evitar que isso ocorra, estabelece-se um limite máximo permitido, em torno de 20% a 30% a partir do qual a irrigação volta a ocorrer.

A Figura 12 indica as diferenças de manejo da água para sistemas de aspersão, comparado com gotejamento.

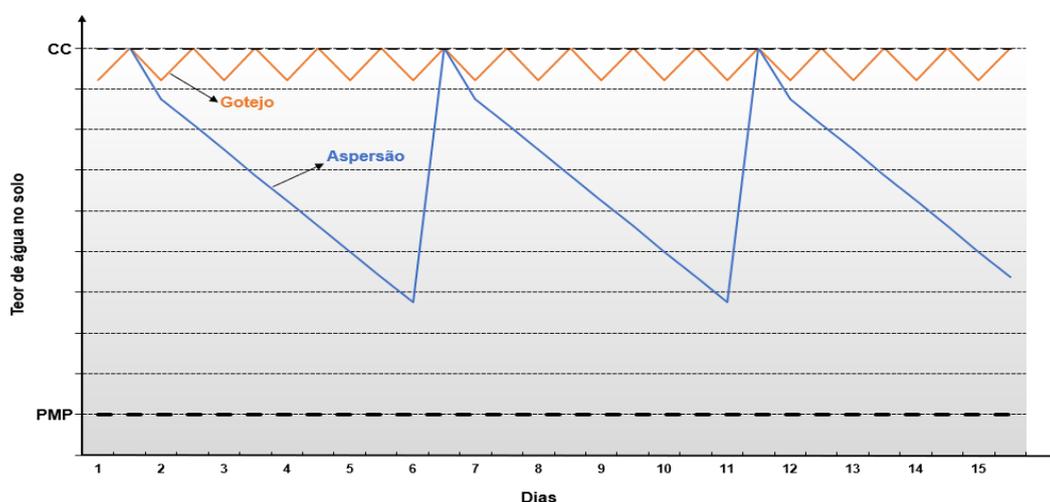


Figura 12. Manejo de água para gotejo e aspersão.

Aplicações mais frequentes de água permitem que o solo se encontre sempre em um estado de umidade perto do ótimo (capacidade de campo). Quando isso ocorre as plantas se beneficiam por serem capazes de absorver água e nutrientes em quantidades suficientes para que todo o processo fisiológico seja otimizado.

À medida que o solo seca, a transpiração diminui, pois há o fechamento dos estômatos, afetando diretamente na produção de energia da planta (fotossíntese) acarretando em perdas de produtividade da lavoura em questão.

3.7 Sistema radicular sob irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento concentra a água e nutrientes em uma porção limitada da área total (faixa molhada devido a superposição dos bulbos).

O desenvolvimento do sistema radicular é intenso nessa porção do solo, induzindo a um grande crescimento de radículas. Essa concentração radicular potencializa a absorção da água e nutrientes, otimizando os processos fisiológicos dos cultivos, que “devolvem” esses benefícios em termos de produção agrícola.

Em zonas áridas e semiáridas, os cultivos dependem apenas da irrigação para a absorção de água e nutrientes, uma vez que as chuvas são escassas ou inexistentes. O desenvolvimento radicular é restrito apenas à faixa molhada formada pelos bulbos (Figura 13).

Em zonas subtropicais e tropicais, com períodos chuvosos representativos, o comportamento do sistema radicular é distinto. As raízes crescem para fora da zona dos bulbos, se beneficiando das chuvas e da fertilidade natural dos solos na área adjacente à faixa molhada. No entanto, uma vez que o processo contínuo de irrigação / fertirrigação está sempre limitado a faixa molhada, a concentração de radículas continua muitas vezes maior do que ocorre na área externa, nos períodos chuvosos.

Pode-se considerar como um “bônus adicional” à contribuição do consumo de água do sistema radicular expandido em épocas de chuvas, em relação ao volume total de água aplicado.



Figura 13. Sistema radicular concentrado no bulbo molhado.

3.8 O solo como alvo

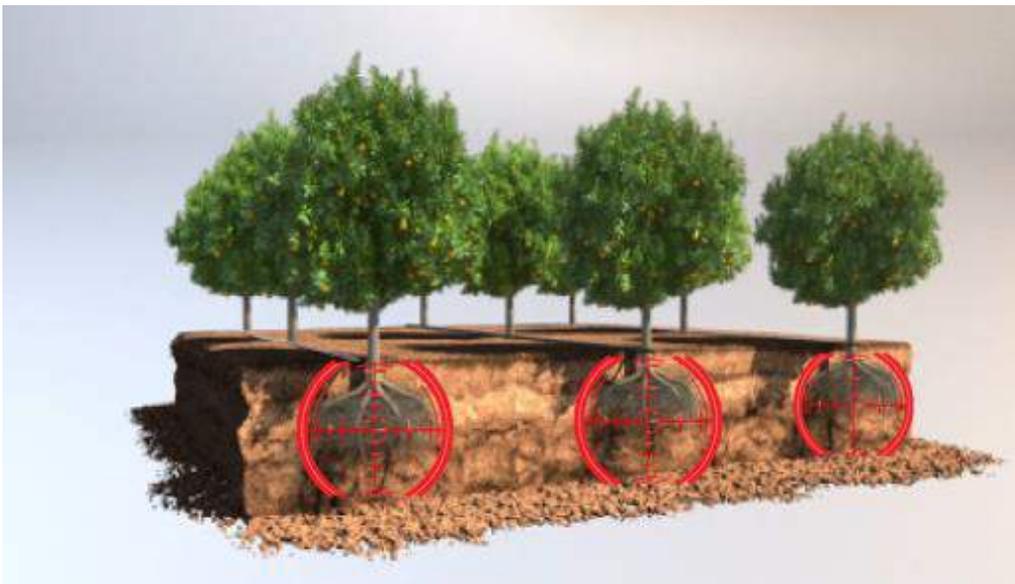


Figura 14. Solo como alvo.

No gotejamento, a irrigação é sempre mais frequente, já que se espera manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo permanentemente. Como premissa, antes do início de uma nova safra ou nas primeiras irrigações, se sugere “encher a caixa de água do solo” e depois manter o mesmo sempre próximo à capacidade de campo.

De maneira similar, a frequência de fertilização (fertirrigação) será muito maior do que na fertilização tradicional; isso faz com que os cultivos estejam sempre bem nutridos. O sistema radicular efetivo vai estar concentrado na faixa molhada, potencializando a absorção de água e fertilizantes, otimizando a produção.

A uniformidade de aplicação de água e nutrientes via gotejo permite um controle muito grande na quantidade de água e fertilizantes, minimizando sua quantidade total, assim como perdas por lixiviação.

Durante todo o processo de irrigação, a área molhada deve ser o centro das atenções do irrigante, uma vez que o bom gerenciamento do processo (água e fertilizantes) nessa região vai produzir os resultados esperados, com altas produtividades (mais produção a menor custo). Essa combinação de fatores faz com que a área molhada e fertilizada pela irrigação por gotejo seja considerada como o alvo principal a ser alcançado e administrado.

3.9 Fertirrigação, nutr irrigação e *drip protection*

Sistemas de irrigação por gotejamento aplicam água com uma precisão e economia única, fazendo com que a eficiência na utilização e aplicação dos recursos hídricos seja incomparável. A uniformidade e eficiência de aplicação de água chega a 95%, ou seja, praticamente toda a água efetivamente aplicada é benéficamente utilizada pelas plantas, sem perdas. A possibilidade de se aplicar água com esse grau de precisão levou os usuários de irrigação por gotejamento à utilização desse sistema para a aplicação de fertilizantes via água de irrigação, criando um novo vocábulo, a fertirrigação. Incorporou-se dessa maneira todas as vantagens de um sistema preciso como o gotejamento à prática da fertilização.

A fertirrigação é uma técnica fundamental quando se utiliza o gotejamento para a irrigação de qualquer cultivo. A abordagem moderna é a de que um sistema de irrigação por gotejo é mais do que uma malha hidráulica capaz de distribuir água com controle absoluto, mas sim um sistema de distribuição de água, solução nutritiva, defensivos agrícolas, biológicos e orgânicos necessários à lavoura. A fertilização via água é parte fundamental do sucesso que os sistemas de irrigação por gotejamento vêm obtendo no mundo e deve ser interpretado como uma técnica indissociável da irrigação. Para todos os efeitos, sempre que se aborda o tema de irrigação localizada, em especial o sistema de gotejamento, entenda-se fertirrigação.

Com a técnica da fertirrigação, pela primeira vez na história da agricultura, pode-se controlar com precisão as quantidades de fertilizantes necessários ao cultivo, adequando-se à fase de crescimento do plantio, época do ano, estado nutricional da planta, entre outros. Pode-se corrigir com facilidade qualquer deficiência apresentada assim como prover às plantas exatamente o necessário, na época desejada, de acordo com o estado fenológico do cultivo, sem desperdícios. Isso acarreta economias de escala no processo de fertilização das lavouras, fazendo com que os custos operacionais e de produção diminuam. A eficiência de absorção é potencializada, uma vez que os fertilizantes são aplicados em conjunto com a água, que é o veículo de entrada nas plantas.

3.9.1 Aspectos agronômicos da fertirrigação

Já se mencionou anteriormente de que o sistema radicular dos diferentes cultivos, quando irrigado por gotejo se localiza na faixa úmida formada pelos bulbos molhados. Nesse caso, observa-se uma concentração de radículas que chega a ser muitas vezes maior do que aquela encontrada em condições de sequeiro, uma vez que a planta reconhece que naquele local existe água, nutrientes e oxigênio em abundância.

Os nutrientes aplicados serão consumidos na região do bulbo molhado (local onde estão concentradas grande parte das raízes de absorção das plantas) (Figura 15).

É fundamental para o sucesso agrônômico que essa porção do solo esteja sempre adequadamente irrigada e fertilizada (fertirrigação).



Figura 15. Café Conilon com gotejamento subterrâneo no extremo Sul da Bahia.

Dividindo-se a quantidade total de fertilizantes que se aplicaria em uma temporada em várias aplicações, tem-se um regime de fertilização totalmente distinto daquele que se obtém quando se fertiliza a lavoura da maneira tradicional. Pode-se por exemplo aplicar a quantidade de nutrientes necessária para um período de um mês em quatro aplicações semanais, ou oito aplicações (duas vezes por semana), ou até diariamente (conceito chamado de Nutrirrigação ou Fertirrigação proporcional).

Como regra prática se recomenda uma frequência de fertirrigação de no mínimo uma vez por semana. O resultado desse novo modo de se fertilizar tem um impacto agrônômico importante nos cultivos e na economia do processo de fertilização (mão de obra e quantidade total de nutrientes).

Sob o ponto de vista agrônômico, a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes em contrapartida a várias aplicações com dosagens menores tem sérias desvantagens. O parcelamento dos nutrientes, além de melhorar a absorção dos mesmos ainda reduz drasticamente a lixiviação dos nutrientes quando comparado a aplicações mecânicas (convencionais em lavouras de sequeiro).

O aumento da quantidade de nutrientes aplicado ao solo de uma só vez aumenta o teor de salinidade da solução, dificulta a absorção de água e nutrientes pelas plantas devido ao aumento do potencial osmótico no solo, podendo criar uma situação de estresse. Em geral a quantidade de água e nutrientes a disposição dos cultivos diminui à medida em que o teor de sais no solo aumenta. Em contrapartida, se a frequência de fertilização é grande, e as quantidades de fertilizantes aplicadas de cada vez são

pequenas, o potencial osmótico se mantém baixo devido à baixa concentração de sais na solução, aumentando a disponibilidade de água e nutrientes para o cultivo.

As perdas inerentes à fertilização sólida são praticamente eliminadas quando se utiliza a fertirrigação. Inicialmente, uma vez que os fertilizantes serão aplicados em doses pequenas e com grande frequência de aplicação, evita-se problemas de lavagem de nutrientes por chuvas e/ou minimizam-se os problemas de lixiviação. Outro aspecto positivo é o fato de que quando aplicados via solução, os nutrientes se encontram rapidamente disponíveis às plantas, evitando-se o tempo usual que os fertilizantes levam para passarem da fase sólida à fase líquida. Todas as perdas intrínsecas a esse processo são eliminadas.

3.9.2 Vantagens da fertirrigação

São vantagens da fertirrigação: (i) economia de fertilizantes devido à eliminação das perdas por lixiviação e volatilização, e por se aplicar os fertilizantes exatamente onde se concentra o sistema radicular das culturas. Essa economia em geral justifica a utilização de fertilizantes de melhor qualidade, ainda que a custos maiores, (ii) correção rápida das deficiências. Devido à alta concentração de raízes e ao alto teor de umidade encontrado no bulbo, o processo de assimilação dos nutrientes é potencializado pelo cultivo, e (iii) distribuição dos nutrientes no perfil de solo de uma maneira mais homogênea. Controlando-se o sistema de irrigação pode-se evitar lixiviação do nitrogênio assim como, dependendo de quando o fertilizante é aplicado (se no começo ou fim do processo de irrigação) concentra-se o nitrogênio no perfil superior ou inferior do sistema radicular.

3.9.3 Cuidados com a fertirrigação

Os seguintes cuidados devem ser observados na fertirrigação: (i) a utilização de fertilizantes de baixa qualidade e/ou pouco solúveis pode acarretar problemas nos gotejadores, causando precipitação de sais. A combinação de dois ou mais fertilizantes aplicados ao mesmo tempo deve ser analisada por um agrônomo, para evitar-se reações químicas que possam acarretar precipitados na tubulação; e (ii) requer manejo por pessoal habilitado e uma mudança de procedimentos na propriedade. A fertirrigação é uma técnica de caráter intensivo, requerendo dos operadores maior dedicação e um controle mais apurado.

3.9.4 Nutrirrigação (um novo conceito) e fertirrigação

A diferença conceitual entre a fertirrigação e nutrirrigação é que na fertirrigação se estabelece uma aplicação quantitativa de fertilizantes de acordo com uma agenda semanal ou quinzenal de aplicação. Já na nutrirrigação se aplicam os fertilizantes de forma proporcional, onde os nutrientes são sempre disponibilizados em todas as irrigações e de acordo com as fases fenológicas da cultura.

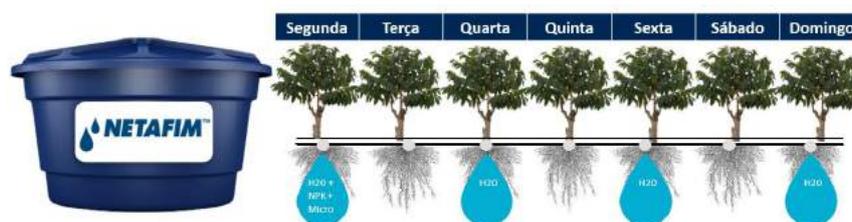


Figura 16. Vista de um sistema de fertirrigação (agenda semanal e quantitativa de fertilizantes) manual, com aplicação de nutrientes semanalmente.

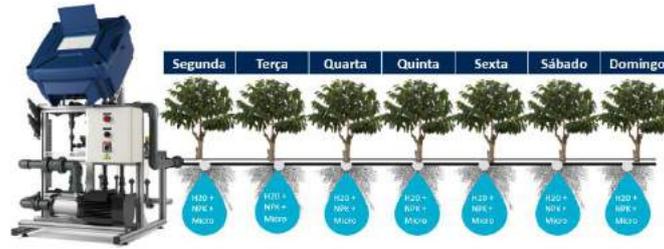


Figura 17. Vista de um sistema de fertirrigação automático denominado de nutr irrigação com aplicações diárias de nutrientes.

3.9.5 *Drip protection*

Similar à prática da fertirrigação, os sistemas de gotejamento podem ser utilizados para a aplicação de produtos químicos (quimigação), como inseticidas, fungicidas, ou qualquer outro produto cujo modo de absorção seja via sistema radicular ou aplicados para controle de nematoides, pragas ou doenças de solo. Os sistemas de gotejamento também podem ser utilizados para aplicar produtos biológicos (como bactérias) ou orgânicos (como ácidos fúlvicos e húmicos).

O fato de que esses produtos sejam distribuídos de forma uniforme e precisa em toda a lavoura apresenta as mesmas vantagens econômicas dos fertilizantes, ou seja, evitam-se os desperdícios, o que por si só já é uma vantagem comparativa importante. Além disso, há uma economia com mão de obra, hora-máquina e consumo de óleo diesel, e uma diminuição da compactação do solo através da passagem intensiva do maquinário para pulverizações mecânicas.

A quimigação é uma prática que deve ser conduzida com muito cuidado. É importante que se utilizem apenas os produtos já liberados pelos órgãos reguladores, de modo a se evitar problemas de meio ambiente e com pessoal de campo.

3.10 Considerações sobre a forma de aplicação de fertilizantes

É possível que em condições de fertirrigação, o cultivo apresente produções muito acima daquelas observadas em condições de sequeiro ou irrigação suplementar (aspersão convencional ou canhões), fazendo com que a quantidade total de fertilizantes aumente para manter essa demanda adicional. O que se pode afirmar com certeza é que para uma determinada produção, a quantidade total de nutrientes é menor quando aplicado via água (fertirrigação/nutr irrigação) do que sob a forma tradicional. Isso se deve única e exclusivamente ao fato de que a eficiência do processo de fertilização é muito maior sob fertirrigação, já que as perdas são mínimas.

A preparação de um programa de fertirrigação exige conhecimentos técnicos sobre os fertilizantes utilizados (qualidade, tipos e solubilidade), análise química da água (sais dissolvidos e pH) e um monitoramento contínuo da lavoura. Se problemas são observados (falta ou excesso de nutrientes) o rumo pode ser facilmente corrigido, mudando-se as concentrações aplicadas. Acima de tudo, essas mudanças podem ser feitas com rapidez, sem permitir danos maiores ao cultivo.

O processo de fertirrigação de uma lavoura passa pelo conhecimento do comportamento da cultura (estado fenológico), manejo adequado do sistema de gotejamento (turno de rega correto), tipos de fertilizantes, compatibilidade ou não entre os mesmos, quantidades de fertilizantes necessária baseada em cargas pendentes, controle e acompanhamento da lavoura durante o ano. É fundamental o apoio de um agrônomo experiente e conhecedor de todo esse processo. Nessas condições o processo pode apresentar resultados expressivos, com produções muito acima das médias usuais.

3.11 Reflexões sobre o futuro da tecnologia de irrigação por gotejamento

O crescimento acelerado da população mundial e a necessidade de se aumentar a produção agrícola, considerando-se as restrições ambientais cada vez maiores, faz com que o interesse na irrigação por gotejo aumente ano após ano. O tema da água (e sua eventual escassez) está cada dia mais presente nas discussões das autoridades, técnicos e na sociedade em geral.

O crescimento da tecnologia de irrigação por gotejamento na última década tem sido expressivo, e aponta para vários cultivos e aplicações especiais que até poucos anos atrás eram impensáveis.

A técnica da irrigação por gotejamento enterrado (*SDI, subsurface drip irrigation*) é conhecida há muitos anos, e sua aplicação que estava restrita a poucos cultivos (hortaliças, tomate industrial, entre outros) vem se expandindo rapidamente. No Brasil, a cana-de-açúcar e o café são alguns dos cultivos que tem se beneficiado do gotejamento enterrado com excelentes resultados.

Nos últimos anos o interesse na irrigação de grãos (soja, milho, trigo) além do algodão, alfafa e pastagens, tem levado a um crescimento acelerado da aplicação de SDI. Os parâmetros de instalação (profundidade, preparo de solo, plantio e instalação por GPS, escolha da vazão e espaçamento dos gotejadores) e o manejo do sistema de gotejamento, incluindo a garantia de germinação dos cultivos e os ajustes do sistema para as condições de plantio direto já está consolidada. O gotejamento enterrado é uma realidade e sua aplicação nos cultivos anuais é uma das áreas de maior potencial de crescimento do gotejo em vários países, em especial no Brasil, Argentina e Estados Unidos.

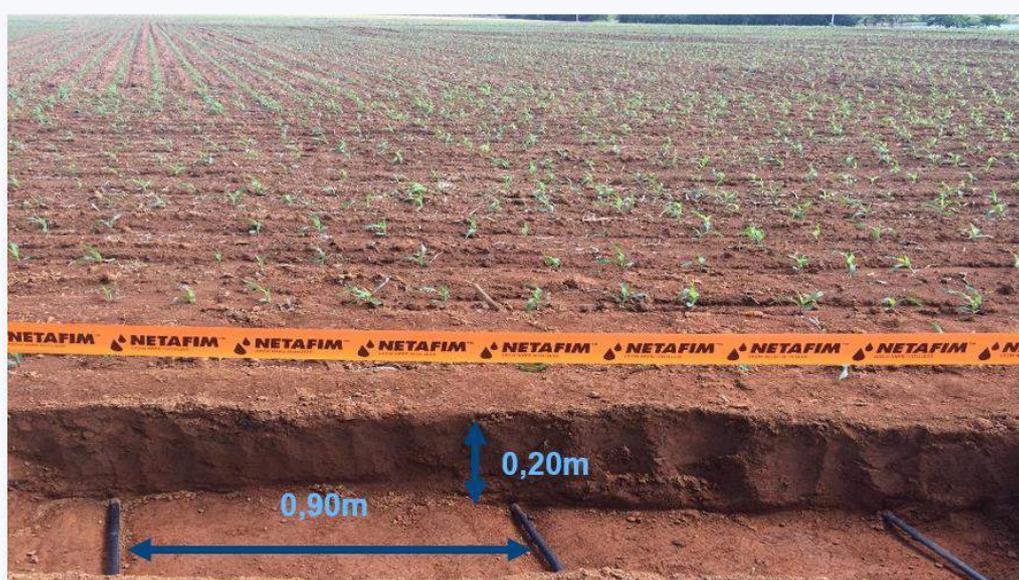


Figura 18. Vista de um sistema de irrigação por gotejamento com linhas enterradas e cultivos anuais.

A utilização de águas residuais de várias indústrias (leiteira, sucroalcooleira, outras) e de reúso de água (reciclada) é mais uma das grandes oportunidades de crescimento. A tecnologia de gotejo enterrado ambiental, E-SDI (*environmental sub surface drip irrigation*), aliado à segurança que os novos gotejadores apresentam, vai permitir que se trabalhe com esse tipo de recurso, aumentando significativamente o volume total de água a ser disponibilizado. Israel recicla e reutiliza mais de 80% do

esgoto para fins de irrigação. Espanha e Estados Unidos são alguns dos outros países onde o reciclado de água para fins de irrigação é comum. Nesse momento essa solução é praticamente inexistente no Brasil e deveria ser considerado com uma alternativa adicional, em especial nas áreas semiáridas do País.

Outro cultivo em que o gotejamento enterrado pode vir a crescer, se destaca o caso do arroz, o cereal mais plantado em todo o mundo. A maneira tradicional do plantio de arroz, por inundação, é cada dia mais questionado dado o grande volume de água utilizado. As experiências com SDI no arroz reduzem em mais 60% o volume de água utilizado com um incremento de produção acima de 20 a 40%. Esses estudos já estão saindo da fase de análise preliminar e em breve entrarão em fase comercial.



Figura 19. Vista de uma área de produção de arroz irrigado com sistema de irrigação por gotejamento com linhas enterradas.

A irrigação por gotejamento, desenvolvida nos anos 60, pode ser considerada a primeira tecnologia “de precisão” utilizada na agricultura. O controle que o sistema oferece, chegando ao limite de se determinar a quantidade exata de água, fertilizantes e produtos químicos aplicado nas lavouras, faz com que naturalmente seja incorporado nesse conceito uma segunda “onda tecnológica”, a agricultura digital.

A irrigação de precisão (gotejamento) já está se beneficiando do impacto das novas tecnologias de controle digital, o *digital farming*, o que vai tornar o gotejamento ainda mais atrativo e eficiente. As novas técnicas de monitoramento, via satélite e/ou drones, vem permitindo um controle absoluto dos cultivos, ao nível de árvores individuais. As características de controle e eficiência da irrigação por gotejo, “casam” perfeitamente com os avanços na digitalização da agricultura.

Um dos impactos imediatos dos avanços da agricultura de precisão / gotejamento é a tendência de se utilizar gotejadores com vazões cada vez menores no futuro. Gotejadores com vazões menores do que 1 L h^{-1} serão utilizados cada vez mais na agricultura; já se estuda emissores de $0,4 \text{ L h}^{-1}$, chegando até a gotejadores de $0,25 \text{ L h}^{-1}$.

Esses mesmos gotejadores serão utilizados para o gotejamento enterrado (SDI) ou para a utilização de águas de baixa qualidade ou residuais (E-SDI). A qualidade desses emissores vai permitir que se trabalhe com os mesmos graus de filtragem dos emissores atuais, sem necessidade de filtros especiais e/ou tratamentos de água sofisticados.

Alguns países têm investido pesadamente em grandes projetos de irrigação por gotejamento para pequenas propriedades, em especial os projetos comunitários na Índia. Pode ser que esse modelo venha a se estender para outros países também, dando oportunidades a pequenos produtores de trabalhar com alta tecnologia de irrigação.

Ainda não é possível avaliar o impacto econômico / social da irrigação por gotejamento quando alcançar os milhares de pequenas e médias propriedades no Brasil, que não irrigam ou irrigam com sistemas menos sofisticados. Novas soluções mais simples e fáceis de instalar vão ser introduzidas no mercado ano após ano. E à medida em que o gotejamento vai chegando a esse mercado (e esse processo é inevitável), vai-se observar um crescimento enorme da tecnologia com reflexos imediatos na produção de alimentos.

3.12 Considerações finais

A irrigação por gotejamento deve ser interpretada como uma tecnologia de distribuição de água e nutrientes, com uma eficiência associada a esse processo sem similar em qualquer outro sistema de irrigação.

A "máquina" que compõe o sistema de irrigação por gotejo, composta por filtros, válvulas reguladoras de pressão, tubos gotejadores regulares ou autocompensados, etc., permite ao usuário um controle e precisão na aplicação de água, fertilizantes e defensivos sem precedente na história da agricultura.

Para que se possa extrair o máximo desse equipamento deve-se utilizar o mesmo dentro de critérios de manejo, adequando-se o sistema a cada caso específico, levando-se em conta as características climáticas e pedológicas onde esses sistemas estão sendo aplicados. Esses são os aspectos da "inteligência" do sistema, que não devem ser relegados a um segundo plano, sob o risco de não se obter os resultados agronômicos esperados. De uma forma simplista pode-se associar a máquina do sistema de irrigação por gotejo com o "*hardware*" de um computador, enquanto a prática do manejo da água e fertirrigação pode ser entendida como o "*software*". O sucesso agronômico requer uma ótima combinação de ambos.

As altas produtividades, a diminuição de custos operacionais e a sinergia existente entre a tecnologia de irrigação por gotejamento com uma política moderna no gerenciamento de recursos hídricos e ambientais, assim como os ganhos de produtividade obtidos pode ser interpretado como o início de uma nova fase na história da agricultura mundial, incorporando uma das mudanças tecnológicas mais profundas já verificadas na produção agrícola, desde que o homem se fixou ao campo.

Referências

BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8. Ed. Viçosa: Ed. UFV, 625p., 2008.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Trickle Irrigation for Crop Production. Design, Operation and Management. **Developments in Agricultural Engineering**, 9. Elsevier, 1986.

CAPÍTULO 4

4 O MANEJO DA IRRIGAÇÃO E O FUTURO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Daniel Fonseca de Carvalho e Luiz Fernando Coutinho de Oliveira

Resumo

O manejo da irrigação é uma técnica fundamental no fornecimento de água, no momento e na quantidade certa para o desenvolvimento normal das plantas. Neste capítulo são abordados aspectos de manejo com base na demanda agrometeorológica da região (lisimetria, tanque Classe A e modelos de estimativa da ET), balanço de água no solo (tensiometria, TDR e FDR) e características fisiológicas das plantas (temperatura foliar, resistência estomática, potencial hídrico e fluxo de seiva), além de manejo com acionamento automático e com *deficit* hídrico controlado.

4.1 Introdução

A água é um fator essencial no desenvolvimento da atividade agropecuária e seu uso otimizado na produção de alimentos constitui um dos principais desafios, principalmente no cenário mundial de mudanças climáticas (SACCON, 2018). Apesar de aproximadamente 20% da área total cultivada no planeta ser irrigada, sua participação atinge 40% da produção de alimentos, fibras e culturas bioenergéticas (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2017), demonstrando a importância da irrigação na viabilização do setor agrícola em diferentes regiões.

A agricultura irrigada mundial ocupa uma área estimada de 310 Mha, sendo 75% localizada na Ásia. De acordo com o censo Agropecuário 2017, o Brasil irriga cerca de 7,0 milhões de ha (CARVALHO *et al.*, 2020), se colocando entre os dez países com maior área irrigada no mundo. Em termos globais, a área irrigada deve aumentar nas próximas décadas e atingir 402 Mha até 2030, sendo 40 Mha em países em desenvolvimento (DARKO *et al.*, 2015). Como consequência, as reservas hídricas poderão ser afetadas e por isso, o uso sustentável da água tem se tornado cada vez mais uma preocupação mundial (VELASCO-MUÑOZ *et al.*, 2018). No Brasil, a área potencialmente irrigável é avaliada em 61,4 Mha, sendo 18,4 Mha em regiões com alta aptidão de solo e relevo (SPAROVEK *et al.*, 2015).

O uso racional da água na agricultura irrigada deve nortear o planejamento e, principalmente, o manejo da irrigação. Embora a irrigação esteja associada a níveis tecnológicos elevados (MAROUELLI *et al.*, 2011), a irrigação no Brasil ainda é praticada de forma inadequada, resultando em grande desperdício de água. Nesse sentido, a estimativa da necessidade hídrica das culturas assume grande destaque, na medida em que se busca maximizar a produção e minimizar os custos. Portanto, o manejo da irrigação tem como objetivo aplicar água às plantas na medida correta (quanto?) e no momento adequado (quando?), o que não constitui uma tarefa fácil. Envolve tomada de decisão e, por isso, é fundamental que os produtores irrigantes e todos os agentes envolvidos tenham consciência da importância da água e saibam que a técnica da irrigação não pode ser confundida com molhação ou encharcamento do solo.

A aplicação de água em quantidade insuficiente para atender à necessidade hídrica da planta, normalmente proporciona baixos níveis de produtividade, porém, a aplicação em excesso, que pode parecer uma segurança para o agricultor, favorece a lixiviação de nutrientes, mantém o solo com baixa aeração, aumenta os custos de

produção e compromete a qualidade e a produtividade dos cultivos. Além disso, a aplicação excessiva provoca redução na disponibilidade de recursos hídricos da região, comprometendo o seu uso para outras atividades e até mesmo para aumento da área irrigada pelo agricultor.

Apesar dos benefícios relacionados à atividade, muitos irrigantes ainda não adotam qualquer estratégia de manejo de água da irrigação, muitas vezes em função carência de informações meteorológicas, desconhecimento da capacidade de retenção de água no solo, baixa prioridade do manejo da irrigação em relação às demais atividades agrícolas (calendário de semeadura/colheita, adubação, aplicação de defensivos, entre outros), falta de informação/consciência ambiental e falta de assistência técnica especializada.

O manejo da água na agricultura irrigada pode ser executado com diferentes bases de informação: demanda agrometeorológica na região, balanço de água no solo e características fisiológicas das plantas. É comum o uso de mais de uma dessas bases de informação, sendo a demanda agrometeorológica associada a um balanço de água no solo a forma mais usual. A despeito do fato de que parâmetros fisiológicos da planta deveriam sempre ser utilizados para o correto manejo da irrigação, pois refletem o real estado hídrico da cultura, em situação prática ainda são pouco utilizados, pois seus processos de avaliação, de um modo geral, são mais caros, trabalhosos e complexos para uso comercial quando comparados àqueles com base no solo e em dados climáticos.

4.2 Manejo da água baseado em dados climáticos

Os fatores ambientais influenciam a transpiração dos vegetais à medida que alteram o gradiente de vapor d'água entre a superfície da folha e o ar que a envolve. Assim, os principais fatores que afetam a evapotranspiração e, conseqüentemente, o consumo de água das plantas são o balanço de energia entre o solo e a folha, a umidade e temperatura do ar, o vento e a disponibilidade hídrica (ANGELOCCI, 2002).

O consumo de água do conjunto solo-planta, conhecido também como necessidade hídrica da cultura, corresponde à quantidade de água que é transferida para atmosfera na forma de vapor, caracterizando o processo da evapotranspiração (ET), que é um fator básico na determinação do total de água necessária à cultura, quando se deseja um manejo correto da água nos trabalhos de irrigação e drenagem.

Existem diferentes metodologias para medição ou estimativa da ET e em função da sua magnitude nos balanços hidrológicos, pequenos erros em seus valores podem representar volumes substanciais de água. Serão discutidas as técnicas da lisimetria e da estimativa de ET por modelos e tanque Classe A.

4.2.1 Manejo da irrigação por lisimetria

Os lisímetros tem sido largamente empregados para desenvolvimento, calibração e validação de modelos de ET (ALLEN *et al.*, 2011), visando caracterizar a evapotranspiração de grandes áreas de cultivo. Porém, tanto para essas finalidades quanto para manejo de irrigação, é primordial que as condições vegetativas e ambientais no lisímetro representem áreas maiores, ou seja, a vegetação no interior do lisímetro deve apresentar as mesmas condições (altura e área foliar semelhante) da vegetação na área que o circunda.

Os principais fatores ambientais que afetam as medições da ET nos lisímetros são os efeitos da advecção, as dimensões do lisímetro, a espessura e a distância entre

as paredes do lisímetro, a altura de suas bordas, além das diferenças de densidade entre a vegetação dentro e fora do lisímetro. Assim, os lisímetros devem apresentar paredes e abertura entre as paredes interna e externa com a menor espessura possível. No manejo do sistema de irrigação, devem ser aplicadas as mesmas lâminas de água dentro e fora do lisímetro para que o regime de umidade no seu interior acompanhe umidade da área adjacente.

De acordo com Allen *et al.* (2011), os lisímetros podem ser agrupados em três categorias: (i) de lençol freático constante, que fornecem dados confiáveis para períodos semanais ou maiores, e representam áreas onde o lençol freático está próximo da superfície e é mantido no mesmo nível dentro e fora do lisímetro, (ii) de percolação, frequentemente empregados em áreas de alta precipitação, em que as variações na água armazenada no solo são determinadas por métodos de determinação da umidade ou por medidas de entradas (precipitação e irrigação) e saída (volume percolado), e (iii) de pesagem, em que as variações da água do solo são determinadas pela pesagem de toda a estrutura com balança mecânica ou célula de carga. Quando bem manejados, esse tipo de lisímetro fornece dados mais precisos em períodos curtos de tempo, sendo os de célula de carga os de maior precisão. As células de carga medem uma corrente elétrica que se altera continuamente em função de deformações causadas pela variação da massa sustentada (PEREIRA *et al.*, 2002).

Com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a queda nos custos das células de carga e dos sistemas de aquisição de dados, os lisímetros de pesagem se tornaram de fácil construção e de baixo custo. Segundo Silva *et al.* (1999), além da exatidão, os sistemas de pesagem geralmente apresentam distribuição homogênea da massa do sistema e podem apresentar sensibilidade de até 0,1 kg ou 0,1 mm.

Há vários exemplos de uso da lisimetria no Brasil, podendo citar os trabalhos de Faria *et al.* (2006) que construíram uma bateria de dez lisímetros de pesagem com 2,7 m² de área e 1,3 m de profundidade, e Campeche *et al.* (2011), que instalaram e calibraram um lisímetro circular de grande porte, com 5,72 m² e 1,0 m de profundidade. Essa estrutura foi utilizada para estimativa da necessidade hídrica do coqueiro anão verde em São Cristóvão, SE (SOUZA *et al.*, 2011). Utilizando lisímetro de pesagem com 1,0 m² de área e 0,70 m de profundidade, as necessidades hídricas da berinjela (LIMA *et al.*, 2012), do milho (SOUZA *et al.*, 2012) e repolho (ARAÚJO *et al.*, 2019) foram determinadas na região de Seropédica, RJ.

4.2.2 Manejo com base na estimativa da ETo por modelos

A medição direta constitui a forma mais precisa para a estimativa da ET. Porém, em virtude das limitações associadas à construção e operação de lisímetros, o uso de modelos físico-matemáticos tem se tornado alternativa prática para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e, posteriormente, da evapotranspiração da cultura (ETc).

O boletim FAO 24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977) apresentou diferentes métodos de estimativa da ETo, cujo desempenho variava com relação à adaptabilidade dos mesmos às diferentes condições climáticas locais. Posteriormente, o boletim FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998) apresentou o método de Penman-Monteith como padrão em virtude do seu bom desempenho em regiões com diferentes características climáticas. O método proporciona resultados que se aproximam da ETo, por representar as condições físicas presentes no processo e incorporar variáveis fisiológicas e aerodinâmicas.

A ETc é obtida pela multiplicação do valor de ETo pelo coeficiente de cultivo (Kc) que é dependente do tipo de cultura, de parâmetros climáticos, da taxa de evaporação

do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura. O coeficiente de cultivo pode se constituir de um único valor (K_c único) ou da soma de dois valores, descrevendo separadamente o efeito da evaporação (K_e) e da transpiração (K_{cb}) entre as superfícies (grama x campo cultivado). Para fins de planejamento e manejo da irrigação, normalmente tem sido utilizado o K_c único, sendo esta metodologia mais popular.

Os valores de K_c para diferentes culturas são facilmente encontrados na literatura. Porém, os valores devem ser usados com cautela, pois são válidos para culturas que estejam em desenvolvimento pleno, sem apresentar qualquer tipo de deficiência hídrica ou nutricional. Além disso, os valores divulgados pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998) são válidos para clima sub-úmido, no qual a umidade relativa média mínima diária se encontra na faixa de 45% e a velocidade média do vento de $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Sempre que as condições climáticas locais diferirem destas, os coeficientes devem sofrer correções para que possam melhor representar a evapotranspiração do cultivo. Esse problema é resolvido quando valores de K_c são determinados diretamente em campo, levando em consideração os aspectos regionais.

4.2.3 Manejo com base na ETo obtida pelo tanque Classe A

A evapotranspiração pode também ser estimada por meio de medidas da taxa de evaporação de uma superfície líquida, sendo esta obtida diretamente em aparelhos denominados evaporímetros. Os mais conhecidos são os atmômetros e os tanques de evaporação, e medem o poder evaporativo da atmosfera, influenciado pelos efeitos da radiação, temperatura, vento e umidade.

Apesar de sofrerem grande influência das condições ambientais, os tanques de evaporação são muito empregados para manejo de irrigação, sendo o Classe A é o mais conhecido. Consiste em um tanque circular construído em chapas de aço galvanizado ou inox, com 120,7 cm de diâmetro e 25,0 cm de profundidade. É instalado sobre um estrado de madeira, em nível, com 15 cm de altura, o qual é colocado normalmente sobre um terreno gramado. Segundo recomendações da FAO (ALLEN *et al.*, 1998), o nível da água no tanque deve ser mantido entre 5,0 e 7,5 cm abaixo da borda, devendo haver reposição ou retirada de água quando o nível estiver fora da faixa. A medida da evaporação pode ser realizada manualmente, utilizando uma régua ou um parafuso micrométrico, também denominado micrômetro de gancho, instalado dentro de um poço tranquilizador. A vantagem de se utilizar o parafuso micrométrico é obter uma leitura mais precisa do nível d'água. Quando se utilizam sensores de nível, normalmente os mesmos estão acoplados a sistemas de aquisição de dados (*datalogger*) permitindo, inclusive, leituras de evaporação em curtos espaços de tempo.

O tanque Classe A constitui um dos métodos mais simples e viáveis para o manejo da irrigação, pois o agricultor irrigante pode, sem muita dificuldade, dispor de um equipamento na propriedade. O método consiste em obter leituras de evaporação, que são geralmente obtidas diariamente na parte da manhã. As leituras de evaporação (EV) devem ser convertidas em ETo por meio de um coeficiente, denominado K_t , que depende das condições locais onde o tanque está instalado, da bordadura, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Pode ser obtido por meio de equações ou em tabelas, para as condições de presença e ausência de cobertura na bordadura.

4.2.4 Manejo com base na evapotranspiração por sensoriamento remoto

A nível de bacia hidrográfica ou em grandes áreas cultivadas, a estimativa da evapotranspiração pode ser feita por meio de técnicas de sensoriamento remoto, permitindo a obtenção de dados com alta resolução espacial e temporal e rapidez na

coleta de informação. A partir das interações físicas na interface superfície-atmosfera, Bastiaanssen *et al.* (1998) propuseram um algoritmo para a estimativa instantânea das componentes do balanço de energia por sensoriamento remoto, denominado Balanço de Energia para Superfície Continental (*Surface Energy Balance for Land - SEBAL*), tornando possível quantificar a evapotranspiração de uma cultura, em tempo real. De acordo com Monteiro *et al.* (2014), o SEBAL considera a variabilidade espacial de elementos micrometeorológicos por meio de funções semiempíricas, estimando a evapotranspiração a partir de imagens de satélite e de dados da região, como temperatura do ar e velocidade do vento.

O algoritmo já foi avaliado em diferentes regiões do Brasil, apresentando resultados satisfatórios na cultura do algodão no semiárido cearense (SANTOS *et al.*, 2010), no cultivo da soja no Rio Grande do Sul (MONTEIRO *et al.*, 2014), em café no cerrado mineiro (COSTA *et al.*, 2019), dentre outros.

4.3 Manejo da água baseado no balanço de água no solo

Seja pelo conteúdo ou pela medida da energia com que está retida pela fração sólida do solo, a quantidade de água no solo é uma variável utilizada em diversos estudos, sendo o seu monitoramento um importante componente no manejo da água para irrigação. O método padrão de determinação da umidade é baseado em amostragem de solo e análises gravimétricas do material coletado, necessitando para isso, um período de no mínimo 24 h entre as medidas da massa úmida e da massa seca do material de solo. A partir da década de 1960, vários métodos foram sendo desenvolvidos e com os novos dispositivos eletromagnéticos baseados em dielétrico e capacitância, medidas do conteúdo de água do solo começaram a ser empregados em substituição ao procedimento gravimétrico (padrão).

Todos os métodos de determinação da umidade possibilitam a estimativa da lâmina de água a ser aplicada por meio do produto entre a água disponível útil e a profundidade do sistema radicular da cultura em questão (FOLEGATTI *et al.*, 2004). A água disponível no perfil é dada pela diferença da umidade na capacidade de campo, em volume, com umidade atual do solo.

Além do método gravimétrico (padrão) existem diversas metodologias para monitoramento da água no solo, destacando-se o tensiômetro, pela praticidade e baixo custo, e as técnicas da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e da frequência (FDR). A opção por um determinado método varia de acordo com a finalidade, os objetivos e a disponibilidade instrumental existente.

4.3.1 Manejo com base na umidade do solo utilizando tensiômetro

No método tensiométrico, a determinação da umidade do solo é feita de forma indireta, a partir da tensão com que a água está retida no solo. A leitura obtida no tensiômetro é utilizada para calcular o potencial matricial de água no solo, a partir do qual é possível obter o valor do conteúdo de água no solo por meio de modelos matemáticos que descrevem o comportamento da curva característica, também denominada de curva de retenção da água no solo. Existem diversos modelos desenvolvidos para representar a curva de retenção sendo o de Van Genuchten (1980), o mais utilizado.

O tensiômetro pode medir tensões cujo potencial matricial varia de 0 (saturação) a -0,75 atm, atingindo somente uma parte da "água útil do solo" (em solos arenosos, cobre $\pm 70\%$ e em solos argilosos, $\pm 40\%$). Este intervalo, apesar de limitado, representa uma importante faixa de potencial e umidade do solo em práticas agrícolas.

Além dos modelos tradicionais (tensiômetros de Bourdon e de mercúrio), tem sido muito utilizado o tensiômetro de punção, que mede o potencial matricial a partir de um tensiômetro digital ou analógico, cuja vantagem é se dispor de apenas um dispositivo de leitura (tensiômetro) para um grande número de sensores na área irrigada. Em complemento, os transdutores de pressão têm sido adaptados a tensiômetros de punção, facilitando o armazenamento das leituras em dispositivos *datalogger*.

4.3.2 Manejo com base na umidade do solo utilizando TDR

O equipamento baseado na reflectometria no domínio do tempo constitui um dos mais modernos medidores de umidade no solo e se baseia no tempo de decaimento de um sinal ou o tempo de retorno de um pulso elétrico. O equipamento em si é um transmissor/capacitor de ondas, o qual conectado a cabos e hastes metálicas, emite um sinal de onda ou um pulso no solo. Este sinal se interage com o meio onde se deseja medir a umidade, e um sensor realiza a leitura do seu comportamento e apresenta ao usuário. O equipamento emite um pulso na frequência de microondas e o tempo de retorno é da ordem de décimos de segundos.

Para se medir o conteúdo de água no solo são utilizados diferentes tipos de sonda que são cravadas no solo a fim de medirem as variações, no tempo, da propagação de um pulso elétrico. Os tipos mais comuns são as sondas de cabo paralelo que podem ser construídas com gabaritos apropriados.

Pelo fato de o solo, em geral, ser composto por partículas minerais, orgânicas e água, as constantes dielétricas (K_a) para esses materiais são bem distintas, atingindo, aproximadamente, 1,0 para o ar, de 3,0 a 7,0 para as partículas minerais e de 80,0 para água. Justamente devido à grande diferença dos valores de K_a da água para os outros constituintes do solo, a velocidade de propagação de uma onda de energia em hastes paralelas inseridas no solo é dependente do conteúdo de água no mesmo, fazendo com que a TDR seja um método eficiente de se avaliar a umidade no solo. De posse de K_a , a umidade do solo (θ) é obtida por meio de equações, que de preferência, devem ser calibradas diretamente na área a ser monitorada, para maior confiabilidade. Apesar do custo elevado, a técnica permite a medição do conteúdo de água do solo próximo à superfície; permite medidas em ampla faixa de umidade do solo, e permite a obtenção de leituras em faixas específicas de profundidade; para isso, instala-se a sonda no sentido horizontal.

Apesar da existência de modelos de calibração disponibilizados pelos fabricantes, é recomendado que seja realizada calibração local a fim de se obter com maior confiabilidade, valores de umidade do solo para fins de manejo da irrigação. A calibração consiste em coletar, periodicamente, amostras de solo para determinação direta da umidade e medir a constante dielétrica na mesma profundidade. Medidas como estas sendo realizadas vão gerar um conjunto de dados ($\theta \times K_a$) que trabalhados em um pacote estatístico, permitirá a obtenção de uma curva de calibração, após análise de regressão, que correlacione tais variáveis. Essas curvas devem ser obtidas para diferentes profundidades do perfil e tipos de solo existentes na área de plantio.

A TDR foi utilizada por Souza *et al.* (2011) no manejo da irrigação do pimentão, cultivado em diferentes sistemas de cultivo. Por meio das medidas de K_a , a necessidade hídrica da cultura foi determinada, que relacionada à ETo por Penman-Monteith, permitiu o estabelecimento dos coeficientes de cultivo (Kc) para a região. A mesma metodologia foi utilizada por Oliveira Neto *et al.* (2011) no manejo da irrigação no cultivo da beterraba, sendo determinados os coeficientes de cultivo em sistema orgânico de

produção sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. Carvalho *et al.* (2014) utilizaram o TDR100 (Campbell Sci.) no manejo da irrigação da cenoura, cultivada com diferentes suprimentos de água. As sondas foram instaladas horizontalmente sob as linhas de irrigação por gotejamento, nas profundidades de 0,05, 0,10 e 0,20 m.

4.3.3 Manejo com base na umidade do solo utilizando FDR

A medida da umidade do solo pode ser realizada por meio dos sensores de FDR, também conhecida por sonda de capacitância. Os sensores do tipo capacitivos têm seu princípio de funcionamento baseado na capacitância elétrica que determina por sua vez a constante dielétrica do solo. Quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico deste capacitor. A capacitância aumenta com o aumento do número de moléculas de água livre, e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (PALTINEANU; STARR, 1997).

Os sensores FDR são confundidos com os TDR, pois ambos medem a constante dielétrica do solo. Entretanto, a FDR mede o tempo de carga de um condensador e este é função da constante dielétrica do solo que rodeia o condensador, enquanto a TDR determina a constante dielétrica de um meio, medindo o tempo que leva uma onda eletromagnética a propagar-se por uma linha de transmissão, sendo função da constante dielétrica do meio que rodeia a linha de transmissão.

Este tipo de sensor de determinação de umidade permite a medição em várias profundidades e locais em tempo real e têm sido utilizados no manejo da irrigação em diferentes culturas, requerendo como qualquer medidor de umidade, a calibração prévia para o solo que será monitorado. A calibração é feita de forma semelhante à descrita para os sensores TDR.

Mounzer *et al.* (2008) monitoraram o conteúdo de água no solo no cultivo do pessegueiro (*Prunus persica* (L.) Batsch cv. Flordastar) irrigado com 100% da ETC, de acordo com a metodologia da FAO 56, e com doses e frequência de irrigação ajustadas continuamente a partir do conteúdo de água na zona radicular obtido pelas sondas de capacitância de FDR. A partir deste manejo, os autores concluíram que o tratamento de irrigação programado de acordo com as medições da sonda de capacitância proporcionou uma economia de 18% da água de irrigação em relação ao tratamento convencional programado e não teve efeito sobre a produção total ou o crescimento vegetativo de pessegueiros jovens.

4.4 Manejo da água a partir de informações na planta

As relações hídricas na planta envolvem a absorção da água do solo, sua translocação pela planta e a transpiração para a atmosfera, ou seja, a planta integra os efeitos das condições ambientais e faz a interface entre o solo (reservatório de água) e a atmosfera ("sumidouro") (MAROUELLI *et al.*, 2011). De toda a água absorvida pelo sistema radicular apenas uma pequena fração fica retida na planta, sendo a maior parte transferida para a atmosfera na forma de vapor, por meio da parte aérea. A transpiração se torna mais evidente em plantas cultivadas, as quais exigem centenas de quilogramas de água para produzir um quilograma de matéria seca. Numa planta de milho, por exemplo, já foi verificado que cerca de 98% da água absorvida é evaporada, 1,8% é retida na planta e apenas 0,2% é utilizada na fotossíntese.

A princípio, a transferência de água por transpiração pode parecer algo negativo, mas o potencial para tais quantias volumosas de água apresenta profundas implicações no crescimento, produtividade e sobrevivência das plantas, o que alguns autores

chamam de evaporação produtiva. A redução no crescimento devido ao estresse hídrico é a principal causa de perdas econômicas e o fracasso de colheita em todo o mundo.

A planta interage com as condições do ambiente formando um sistema, denominado solo-água-planta-atmosfera. O resultado dessa interação se manifesta na aparência visual da planta, principalmente coloração e ângulo de posição das folhas, e em atributos fisiológicos, como a transpiração, o potencial hídrico foliar, o potencial osmótico, a resistência estomática, a temperatura foliar do dossel que caracterizam seu estado hídrico. Portanto, a possível quantificação desses atributos fisiológicos representa um método potencial de manejo de irrigação.

4.4.1 Temperatura foliar

Na natureza, a transpiração desempenha um importante papel no arrefecimento das folhas. Portanto, as plantas evaporam grandes quantidades de água para a atmosfera e, assim, dissipam grandes quantidades de energia rebaixando assim a temperatura da sua parte aérea. Ao se medir as temperaturas do ar (T_a) acima do dossel e a da parte aérea de uma cultura (T_c), pode-se determinar um diferencial de temperatura, que se correlaciona com a disponibilidade de água no solo. Assim, quanto maior for este diferencial menor será o *deficit* de umidade no solo, permitindo que a planta transpire para promover o arrefecimento das folhas. Por outro lado, se há *deficit* de umidade no solo, haverá um decréscimo da transpiração que promoverá um aquecimento das folhas, fazendo com que T_c se torne maior que T_a .

O diferencial de temperatura ($T_c - T_a$) pode ser associado aos deficits de umidade no solo e do vapor d'água na atmosfera e ao fluxo de calor sensível. Jackson *et al.* (1981) sugeriram que a disponibilidade de água para uma dada cultura pode ser estimada por meio da normalização do domínio da diferença de temperatura entre T_c e T_a . A técnica da termometria de infravermelho pode ser empregada na estimativa da evapotranspiração, por meio da determinação do calor sensível da equação do balanço de energia de uma cobertura vegetal ou da resistência aerodinâmica do dossel. Essas variáveis compõem o modelo de Penman-Monteith.

4.4.2 Transpiração e resistência estomática (porometria)

A perda de água por transpiração nas plantas se deve à transpiração cuticular, à transpiração lenticular e à transpiração estomática, sendo esta última a mais importante na interação entre a planta e o ambiente. Quando os estômatos abrem, o grau de saturação mantido nos espaços intercelulares depende da taxa de difusão do vapor para o exterior, e esta depende, por sua vez, da resistência estomática e da densidade de pressão de vapor da atmosfera.

O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera depende dos gradientes de potencial e das condutividades hidráulicas no solo, nas raízes, no xilema, nos estômatos e na camada de ar acima do dossel. Desconsiderando a resistência cuticular, pode-se assumir que a resistência foliar devido à difusão de vapor de água para a atmosfera se deve à resistência estomática, que é variável com o nível de turgescência das células. O aumento da resistência estomática no decorrer do dia, provocado pelo aumento do *deficit* de pressão de vapor, promove uma perda de turgescência das folhas, justamente para prevenir um aumento da taxa de transpiração.

Não há métodos biofísicos que permitam a medição direta e quantitativa da abertura estomática no campo. No entanto, aparelhos denominados porômetros podem ser empregados para medições indiretas da verdadeira abertura total dos estômatos nas plantas. O porômetro de difusão, também chamado de equilíbrio dinâmico, mede a

taxa de transpiração de parte da folha numa câmara ventilada, mantendo um balanço de entrada de ar seco, controlado de acordo com a taxa de transpiração. Na utilização deste equipamento, selecionam-se folhas saudáveis sem sintomas de deficiência nutricional ou ataque de pragas e doenças, e posicionadas no terço médio da altura total da planta. O aparelho registra a resistência estomática, radiação na faixa do visível, temperatura da folha e da câmara, umidade relativa e a transpiração. Essas leituras devem ser feitas nas partes superiores e inferiores das folhas devido às diferenças do número de estômatos. Curvas diárias da resistência estomática são valiosas para a melhor interpretação do comportamento da planta em relação ao *deficit* de água no solo e à demanda de água pela atmosfera.

4.4.3 Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar indica o estado hídrico das plantas, expressando a reação da planta ao excesso ou ao *deficit* de água no solo, e permitindo, assim, definir o momento de se iniciar a irrigação. O estado hídrico da planta é dinâmico, modificando não somente em função da disponibilidade de água no solo e das condições atmosféricas, mas também com o estágio de desenvolvimento da planta. O nível de hidratação de um tecido está intimamente relacionado com atividade fisiológica deste. Assim, o potencial hídrico pode ser aplicado como atributo para se avaliar a atividade fisiológica de um tecido ou célula. Nesse sentido, o comportamento estomático e a fotossíntese, entre outros processos, podem ser afetados pelo decréscimo do potencial hídrico foliar, resultante de estresse hídrico ocorrido em qualquer estágio de desenvolvimento da planta.

Quando os estômatos estão fechados, a pressão de vapor nos espaços intercelulares está muito perto da saturação; quando os estômatos se abrem, inicia-se o processo de difusão do vapor para o exterior, desenvolvendo um gradiente de pressão de vapor entre as paredes das células, local de evaporação, e a câmara estomática.

O potencial total da água e seus principais componentes podem ser obtidos por vários instrumentos e em diferentes partes das plantas, sendo o psicrômetro, o higrômetro e a câmara de pressão, ou bomba de Scholander, os mais utilizados na pesquisa científica. Para avaliação do potencial de água na folha, a câmara ou bomba de pressão, ou ainda bomba de Scholander, apresenta boa possibilidade de utilização na irrigação. Esse equipamento tem sido muito aplicado em condições de campo por ser de uso simples e rápido. O equipamento se baseia no equilíbrio das pressões do gás, injetado dentro de uma câmara hermeticamente fechada contendo uma folha, e da água no xilema da folha.

De maneira geral, para culturas em pleno desenvolvimento e se há *deficit* de água no solo, os valores do potencial total de água no solo variam entre -100 a -10 kPa, sendo que na planta, para as mesmas condições, o potencial varia de -4 a -0,5 MPa e na atmosfera, de -100 a -10 MPa (REICHARDT; TIMM, 2004). Essas diferenças de potenciais proporcionam gradientes responsáveis pelo fluxo de água no sistema contínuo solo-planta-atmosfera. Avaliando os potenciais de água no solo, nas folhas de cafeeiros irrigados para as condições do cerrado e na atmosfera, Oliveira *et al.* (2009) obtiveram variações de -69,25 a -2,25 kPa, de -3,13 a -0,21 MPa e de -261,04 a -40,82 MPa, respectivamente, mostrando que existe um grande diferencial de potencial no sistema solo-planta-atmosfera, responsável pelo fluxo de água neste sistema.

4.4.4 Fluxo de seiva

De forma rápida e precisa, os métodos de dissipação térmica são empregados em medições do fluxo de seiva no xilema com o propósito de investigar a taxa de transpiração das plantas, nos quais uma fonte de calor contínua ou um pulso direcionado de calor é produzido por meio de dispositivos termoeletrônicos. Para isso, sensores são fixados ou inseridos nos troncos ou ramos de plantas, principalmente frutíferas lenhosas, para medição do fluxo de seiva que, no período de 24 horas, tem demonstrado grande aproximação com a transpiração.

Na determinação do fluxo de seiva (transpiração), têm sido utilizados métodos que se baseiam no fornecimento de pulsos de calor ao tronco, no fornecimento contínuo de calor ao tronco, como no método da sonda de dissipação térmica, e no método de balanço de calor. Esses métodos se destacam por serem não destrutivos e permitirem o estudo simultâneo da transpiração em muitas plantas em nível de campo. O método de balanço de calor apresenta a vantagem de não necessitar de calibração, enquanto os outros dois, por medirem, em princípio, a velocidade da seiva, exigem a determinação da área efetiva do xilema para o transporte hídrico, a fim de transformar a densidade de fluxo de seiva em fluxo de seiva.

4.5 Manejo da irrigação com acionamento automático

Nos últimos anos tem se observado um expressivo aumento no uso de tecnologias no setor produtivo, tendo por finalidade a otimização, não somente da mão de obra, mas dos diferentes fatores inerentes à produção agrícola. Sob o ponto de vista científico, vários estudos têm sido conduzidos visando a automação de sistemas de irrigação, possibilitando aplicar a quantidade de água necessária à cultura e no momento mais adequado (LEAL *et al.*, 2014).

A automação de sistemas de irrigação, baseada em sensores de umidade do solo, apresenta potencial para fornecer água às plantas por meio da manutenção do conteúdo de água do solo num intervalo desejado, considerado ótimo ou adequado para o crescimento da planta (MUÑOZ-CARPENA; DUKES, 2005). Um sistema de irrigação automatizado, quando bem programado, apresentará vantagens em relação aos sistemas tradicionais, pois o acionamento manual geralmente é realizado de forma irregular e sem controle, aplicando lâminas excessivas, além do custo de se dispor de operadores para essa função.

Seguindo a técnica de manejo com base no monitoramento da tensão de água no solo, Medici *et al.* (2010) propuseram um acionador automático que utiliza o princípio do tensiômetro, denominado acionador simplificado para irrigação (ASI). Caracterizado como de fácil construção e baixo custo, é composto basicamente de uma cápsula cerâmica, uma mangueira de polietileno e um pressostato ou sensor de nível. O dispositivo pode ser construído utilizando uma vela de filtragem residencial (cápsula) e um pressostato de lavadora de roupa ou louça, facilmente encontrados no mercado.

A cápsula cerâmica é o sensor de solo e deve ser instalada na profundidade que representa o sistema radicular da cultura. Antes da instalação, o sistema deve ser montado e preenchido totalmente com água, a exemplo de um tensiômetro. O pressostato, ligado à rede elétrica, deve estar posicionado a um desnível (h) em relação à cápsula e é exatamente essa altura que irá definir a tensão de acionamento no momento da irrigação. Portanto, estando o sistema instalado e em decorrência da evapotranspiração do cultivo, o conteúdo de água no solo irá diminuir provocando a formação de uma tensão dentro da cápsula que é transmitida pelo tubo flexível até o pressostato. Quando essa tensão atingir o valor correspondente ao desnível "h", o

diafragma do pressostato aciona um comutador estabelecendo a passagem da corrente elétrica que irá acionar uma motobomba ou abrir uma válvula solenoide, fornecendo água ao sistema de irrigação. A água aplicada irá umedecer o solo fazendo com que a tensão na cápsula seja alterada, interrompendo a passagem de corrente elétrica pelo comutador e, conseqüentemente, o fornecimento de água pelo sistema de irrigação. Assim, o próprio potencial matricial da água no solo ou substrato irá comandar o acionamento e o desligamento do sistema, evitando aplicação excessiva ou deficitária.

Sousa *et al.* (2020) avaliaram o ASI para irrigação em substratos agrícolas com diferentes características de retenção de água. A partir de transdutores de pressão instalados na mangueira de polietileno, foram registradas tensões máximas de 3,95 e 3,96 kPa, correspondendo, respectivamente, a 0,37 e 0,50 cm³ cm⁻³, respectivamente, em substratos comercial e em substrato compostos por fibra de coco (56,2%) + vermicomposto (18,8%) + pó de granito (25%). Nestas tensões foram verificados acionamentos com tensão em torno de 4,0 kPa.

Diversos estudos já foram desenvolvidos utilizando o dispositivo, seja em vaso ou em campo, com substrato ou solo de diferentes texturas, cujos resultados têm demonstrado a praticidade e a robustez do equipamento (BATISTA *et al.*, 2013; GOMES *et al.*, 2014, 2017; MELLO *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2018; VALENÇA *et al.*, 2018; BUENO *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2020).

4.6 Irrigação com *deficit* controlado

A técnica de manejo da irrigação com *deficit* controlado consiste em aplicar lâminas inferiores às necessárias para atender a demanda hídrica real da cultura, e apesar de afetar a sua produtividade, apresenta benefícios como o aumento da eficiência de irrigação, redução dos custos da irrigação e redução dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena. Basicamente, a irrigação deficitária controlada visa atender somente uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração, podendo ser praticada com irrigação total ou com irrigação suplementar.

O *deficit* de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou somente nas fases menos críticas ao *deficit* hídrico, com menores reflexos na redução da produtividade da cultura. Para isso, é fundamental que sejam conhecidos os coeficientes de resposta da cultura ao *deficit* hídrico (Ky), obtidos com base em experimentação em campo e divulgados pela literatura. Esta técnica é uma alternativa em cenários em que se prioriza a economia de água e sua eficiência, procurando manter um retorno econômico semelhante ou superior à opção de irrigação plena. Assim, para a sua adoção a campo é necessária uma análise de custo de produção e viabilidade econômica detalhada para cada situação (MARTIN *et al.*, 2012).

As estratégias de irrigação deficitária controlada devem levar em consideração fatores importantes que influenciam o comportamento ecofisiológico e a produção das culturas (SÁNCHEZ-BLANCO; TORRECILLAS, 1995) e tem como objetivo a manipulação do crescimento vegetativo e reprodutivo das plantas, uma vez que o estado hídrico é um fator determinante, que influi em todos os aspectos do crescimento e qualidade do produto final (grãos, frutos, etc.). Os autores chamam a atenção para diversos fatores envolvidos que devem ser considerados para que possa validar experimentalmente a sua adoção, dentre eles as características do clima, do solo e da planta, o método e sistema de irrigação empregados além de informações a respeito da resistência à seca e dos períodos críticos de desenvolvimento da cultura. As estratégias de manejo da irrigação deficitária controlada (IDC) envolvem a aplicação de água em função das

necessidades fisiológicas; do atendimento da porcentagem da demanda de água de uma cultura e a irrigação de salvamento.

4.6.1 Aplicação de água em função das necessidades fisiológicas

A IDC utiliza o estresse hídrico como meio para potencializar a qualidade do produto, aplicando diferentes níveis de restrição hídrica ao longo dos períodos críticos do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das culturas em níveis específicos, de acordo com o solo, para que as reações fisiológicas da cultura possam ser aproveitadas em benefício da produção (TEIXEIRA, 2015). Os períodos críticos podem ser definidos como os momentos fenológicos em que o desenvolvimento de um estresse hídrico pode condicionar de forma considerável a produção ou a qualidade do produto final. Portanto, a programação da irrigação nos períodos críticos constitui um aspecto essencial na irrigação deficitária controlada, e deve ser realizada principalmente nas fases em que o crescimento e a qualidade dos frutos têm baixa sensibilidade ao *deficit* hídrico (COELHO *et al.*, 2006). Neste caso, o enfoque fisiológico se torna relevante, com especial atenção tanto na fenologia da cultura, quanto na sua tolerância ao *deficit* hídrico.

4.6.2 Atendimento da porcentagem da demanda de água de uma cultura

Essa estratégia visa atender somente uma fração da demanda de água da cultura (FRIZZONE, 2007) e, portanto, a lâmina de irrigação é menor que a evapotranspiração da cultura no período, reduzindo a produtividade, mas com a vantagem de se aumentar a eficiência de aplicação, com redução nos custos operacionais. Esta estratégia é utilizada para se produzir mais do que a situação de sequeiro, de forma sustentável, exigindo um menor volume de água em comparação com a irrigação convencional (FRANÇOIS, 2012). Nesse caso, a lâmina de irrigação é determinada a partir de porcentagens da evapotranspiração, do armazenamento da água no solo, da tensão da água no solo ou da fração da área adequadamente irrigada. Quando o manejo é realizado por tensiometria, valores de tensões da água no solo de -30, -40 ou -50 kPa, por exemplo, são pré-fixados, abaixo do valor definido para a condição de água disponível em que a planta ainda consegue evapotranspirar na sua taxa potencial.

4.6.3 Irrigação de salvamento

Consiste na técnica de se irrigar somente as fases do desenvolvimento da cultura mais sensíveis aos deficits hídricos. É uma prática agrônômica muito utilizada nos canaviais, nas regiões que apresentam altos deficits hídricos como as que ocorrem no cerrado brasileiro (SILVA, 2015). Nas regiões de cerrado, as chuvas são sazonais e há alta demanda atmosférica, acarretando altas taxas de evapotranspiração. Assim, a ocorrência de *deficit* de água no solo promove alterações fisiológicas na planta, tais como o aumento da temperatura foliar, diminuição da condutância estomática, transpiração e fotossíntese, os quais implicam em uma redução na assimilação de CO₂, com conseqüente decréscimo da produtividade (ZINGARETTI *et al.*, 2012).

4.7 Considerações finais

Apesar de ser uma técnica milenar, o manejo da irrigação ainda é considerado insatisfatório na maior parte das áreas cultivadas. Quando mal conduzida, além de não produzir os resultados esperados, a irrigação pode causar perdas econômicas e degradação ambiental, levando a um descrédito da atividade e pressões dos órgãos reguladores e da opinião da sociedade como um todo. Os sistemas de irrigação

apresentaram um grande avanço tecnológico, mas o mesmo não tem sido verificado no que se refere à aplicação correta de água para as plantas.

No passado, o manejo da irrigação se baseava apenas no balanço de água no solo, empregando a quantificação da umidade do solo pelos métodos gravimétrico e tensiométrico, ou pelo uso do tanque Classe A. Com o avanço da microeletrônica, métodos de medição da umidade do solo e das condições hídricas das plantas foram desenvolvidos, permitindo uma maior praticidade e rapidez na quantificação da água no solo. Associado a isso, as determinações laboratoriais das características físicas do solo também sofreram inovações com equipamentos mais sofisticados e com o uso de modelos matemáticos para descrever tais características, que associadas às medições de campo, proporcionaram uma maior integração das informações e dos processos de automação dos sistemas.

O desenvolvimento das plataformas automáticas de coleta de dados meteorológicos permitiu programações internas e maior agilidade no balanço hídrico, pela quantificação de chuvas e estimativa da evapotranspiração em tempo real e escala temporal menor que um dia. A ampliação da rede de coletas automáticas e a disponibilização das informações em plataformas digitais, acessíveis por computador e smartphones, associadas às tecnologias de imageamento por radares e sensoriamento remoto, permite ao agricultor a tomada de decisão do momento de irrigar e com controle local, determinar a quantidade de água a ser aplicada.

Atualmente, tem-se a agricultura irrigada de precisão, a nível de propriedade, com o uso de sensores acoplados a estações telemétricas e sensoriamento de baixa altitude com o uso de drones, trazendo ao irrigante uma maior comodidade e praticidade no manejo da irrigação. Informações disponibilizadas nas redes de computadores por órgãos governamentais, como por exemplo o zoneamento de risco climático, vieram também contribuir para a tomada de decisão, na definição do momento ideal de plantio, de modo a aproveitar melhor o regime hídrico, permitindo a aplicação da irrigação suplementar, reduzindo assim o impacto nos corpos hídricos, permitindo assim a ampliação da área irrigada.

O manejo da irrigação visando a otimização do uso da água e a redução dos impactos ambientais continua sendo um desafio para o setor agrícola, e práticas de irrigação suplementar, de irrigação deficitária controlada e o emprego das águas residuárias deverão ser cada vez mais divulgadas e incentivadas.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement Accuracy. **Agricultural Water Management**, v.98, p.899-920, 2011.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.56, 300p., 1998.

ANGELOCCI, L.R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba, Edição do Autor, 272p., 2002.

ARAÚJO, M.S.P.; SOUSA, E.F.; CARVALHO, D.F.; PEREIRA, V.R. Evapotranspiração e coeficientes da cultura do repolho em sistema orgânico. **Irriga**, v.24, p.98-108, 2019.

BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p. 198-212, 1998.

BATISTA, S.C.O.; CARVALHO, D.F.; ROCHA, H.S.; THANER DOS SANTOS, H.; MEDICI, L.O. Production of automatically watered lettuce with a low-cost controller. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.11, p.485-489, 2013.

BUENO, M.M.; LELES, P.S.S.; ABREU, J.F.G.; SANTOS, J.J.S.; CARVALHO, D.F. Water requirement and growth indicators of forest tree species seedlings produced with automated irrigation management. **PLoS One**, v.15, p.e0238677, 2020.

CAMPECHE, L.F.M.S.; AGUIAR NETTO, A.O.; SOUSA, I.F.; FACCIOLI, G.G.; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P.V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.519-525, 2011.

CARVALHO, D.F.; MARTINS, R.C.F.; SANTOS, J.J.S.; TELES, G.C.; GENTILE, M.A.D.; OLIVEIRA, M.S. Evolution and current scenario of irrigated area in Brazil: systematic data analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, p.505-511, 2020.

CARVALHO, D.F.; DOMINGUEZ, A.; OLIVEIRA NETO, D.H.; TARJUELO, J.M.; MARTINEZ-ROMERO, A. Combination of sowing date with deficit irrigation for improving the profitability of carrot in a tropical environment (Brazil). **Scientia Horticulturae**, v.179, p.112-121, 2014.

COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; SIMÕES, W.L.; COELHO, Y.S. Irrigação em citros nas condições do Nordeste do Brasil. **Laranja**, v.27, n.2, p.297-320, 2006.

COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; WOLFF, W.; JOSÉ, J.F.; FOLEGATTI, M.V.; FERRAZ, S.F.B. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. **Scientia Agrícola**, v.76, n.2, p.93-101, 2019.

DARKO, R.O.; YUAN, S.; HONG, L.; LIU, J.; YAN, H. Irrigation, a productive tool for food security - a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B*. **Soil and Plant Science**, v.66, p.191-206, 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.24, 204p., 1977.

FARIA, R.T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.237-242, 2006.

FOLEGATTI, M.V.; SILVA, T.J.A.; CASARINI, E. O manejo da irrigação como elemento essencial na utilização racional dos recursos hídricos. In: THAME, L.C.M. (Ed.). **A cobrança pelo uso da água na agricultura**. Embu: Igual Editora, p.213-219, 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: Identificação de áreas prioritárias**. Brasília, n.1, 243p., 2017.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária**. 2012, 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

FRIZZONE, J.A. Planejamento da irrigação com o uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.24-49, 2007.

GOMES, D.P.; CARVALHO, D.F.; ALMEIDA, W.S.; MEDICI, L.O.; GUERRA, J.G.M. Organic carrot-lettuce intercropping using mulch and different irrigation levels. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.12, p.323-328, 2014.

GOMES, D.P.; CARVALHO, D.F.; MEDICI, L.O.; VALENÇA, D.C.; PINTO, M.F. Growth and production of tomato fertilized with ash and castor cake and under water depths, cultivated in organic potponics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.39, p.201-209, 2017.

JACKSON, R.D.; ISON, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER JUNIOR, R.J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v.17, p.1133-1138, 1981.

LEAL, S.C.O.; CARVALHO, D.F.; MEDICI, L.O. **Dispositivo automático de baixo custo para irrigação**. 1ed. Saarbrücken, Deutschland: Novas Edições Acadêmicas, v.1, 71p., 2014.

- LIMA, M.E.; CARVALHO, D.F.; SOUZA, A.P.; ROCHA, H.S.; GUERRA, J.G.M. Desempenho do cultivo da berinjela em plantio direto submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.604-610, 2012.
- MAROUELLI, W.A.; OLIVEIRA, A.S.; COELHO, E.F.; NOGUEIRA, L.C.; SOUSA, V.F. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Hortaliças; São Luís: Embrapa Cocais; Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011.
- MARTIN, J.D.; CARLESSO, R.; AIRES, N.P.; GATTO, J.C.; DUBOU, V.; FRIES, H.M.; SCHEIBLER, R.B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga**, Edição Especial, p.192-205, 2012.
- MEDICI, L.O.; ROCHA, H.S.; CARVALHO, D.F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R.A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agrícola**, v.67, p.727-730, 2010.
- MELLO, G.A.B.; CARVALHO, D.F.; MEDICI, L.O.; SILVA, A.C.; GOMES, D.P.; PINTO, M.F. Organic cultivation of onion under castor cake fertilization and irrigation depths. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.40, p.1-8, 2018.
- MONTEIRO, P.F.C.; FONTANA, D.C.; SANTOS, T.V.; ROBERTI, D.R. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**, v.73, n.1, p.72-80, 2014
- MOUNZER, O.H.; VERA, J.; TAPIA, L.M.; GARCÍA-ORELLANA, Y.; CONEJERO, W.; ABRISQUETA, I.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C.; ABRISQUETA-GARCÍA, J.M. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. **Agrociencia**, v.42, n.8, nov./dez., 2008.
- MUÑOZ-CARPENA, R.; DUKES, M.D. **Automatic irrigation based on soil moisture for vegetable crops**. Rep. ABE356, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, 2005.
- OLIVEIRA, L.F.C.; OLIVEIRA, R.Z.; CASTRO, T.A.P. Comportamento fisiológico de cafeeiros submetidos a diferentes disponibilidades de água no solo. **Bioscience Journal**, v.25, n.3, p.83-91, 2009.
- OLIVEIRA, M.S.; CARVALHO, D.F.; GOMES, D.P.; PEREIRA, F.A.C.; MEDICI, L.O. Production of cut sunflower under water volumes and substrates with coconut fiber. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, p.859-865, 2018.
- OLIVEIRA NETO, D.H.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CEDDIA, M.B. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. **Horticultura Brasileira**, v.29, p.330-334, 2011.
- PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1576-1585, 1997.
- PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.51-56, 2002.
- PEREIRA, R.M.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; SALES, D.L.; RODRIGUEZ, W.D.M.; SOUZA, J.M.F. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. **Revista Irriga e Inovagri**, v.1, n.2, p.149-157, 2015.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, p. 478, 2004.
- SACCON, P. Water for agriculture, irrigation management. **Applied Soil Ecology**, v.123, p.793-796, 2018.

- SÁNCHEZ-BLANCO, M.J.; TORRECILLAS, A. Aspectos relacionados com la utilización de estratégias de riego deficitario controlado en cultivos leñosos. In: ZAPATA, M.; SEGURA, P. **Riego deficitario controlado**. Mundi Prensa, 188p., 1995.
- SANTOS, C.A.C; BEZERRA, B.G; SILVA, B.B.; RAO, T.V.R. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p.383-392, 2010.
- SANTOS, J.J.S.; PEGO, R.G.; COUTO, B.R.M.; BUENO, M.M.; CARVALHO, D.F. Water requirement, commercial quality and yield response factor of gladiolus produced with automated irrigation on different growing periods. **Ciência e Agrotecnologia**, v.44, p.e017220, 2020.
- SILVA, D.N. Comportamento de genótipos de cana-de-açúcar com irrigação de salvamento em Goianésia-GO. 2015, 68f. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual Paulista, 2015.
- SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise de funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.7, n.1, p.53-58, 1999.
- SPAROVEK, G.; LEITE, C.V.; BARRETO, A.G.O.P.; MAULE, R.F.; DOURADO NETO, D. Análise territorial e potencial da agricultura irrigada no Brasil. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.106, p.50-55, 2015.
- SOUSA, I.F.; AGUIAR NETTO, A.O.; CAMPECHE, L.F.M.S.; BARROS, A.C.; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P.V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.526-532, 2011.
- SOUSA, W.L.; CRUZ, E. S.; MEDICI, L.O.; SALVADOR, C.A.; CARVALHO, D. F. Avaliação de um acionador automático para irrigação em substratos agrícolas com diferentes características de retenção de água. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.3, p.3944-3956, 2020.
- SOUZA, A.P.; LIMA, M.E.; CARVALHO, D.F. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do milho em monocultivo e consórcio, usando lisímetros de pesagem. **Agrária**, v.7, p.142-149, 2012.
- SOUZA, A.P.; PEREIRA, J.B.A.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CARVALHO, D.F. Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v.33, p.15-22, 2011.
- TEIXEIRA, J.I.M.C.V. Efeitos de estratégias de rega deficitária sobre o rendimento e qualidade da casta Touriga Franca na Região do Douro. 2015, 91f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agronómica - Universidade do Porto, 2015.
- VELASCO-MUÑOZ, J.F.; AZNAR-SÁNCHEZ, J.A.; BELMONTE-UREÑA, L.J.; ROMÁN-SÁNCHEZ, I.M. Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. **Sustainability**, v.10, p.1-18, 2018.
- VALENÇA, D.C.; CARVALHO, D.F.; REINERT, F.; AZEVEDO, R.A.; PINHO, C.F.; MEDICI, L.O. Automatically controlled deficit irrigation of lettuce in organic potponics. **Scientia Agricola**, v.75, p.52-59, 2018.
- ZINGARETTI, S.M.; RODRIGUES, F.A.; GRAÇA, J.P.; PEREIRA, L.M.; LOURENÇO, M.V. Sugarcane responses at water deficit conditions. In: RAHMAN, I.M.M.; HASEGAWA, H. **Water Stress**. Intech, p.255-276, 2012.

CAPÍTULO 5

5 A EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO MECANIZADA MOLDANDO OS RUMOS DA TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

Gustavo Fanelli Hossri

Resumo

A tecnologia de aspersores de irrigação possui um papel notório no desenvolvimento da agricultura irrigada. No ramo da aspersão mecanizada via pivô central esse fato é bem evidente. Responsáveis pelo último elo na cadeia de transporte de água ao solo, os aspersores passaram por diversas modificações, ao mesmo passo que as demandas desse mercado se expandiram no Brasil. Embora muitas vezes assumindo um papel coadjuvante no sistema de irrigação, observa-se hoje um grande interesse, tanto da sociedade profissional, quanto do mercado consumidor. O presente capítulo visa ilustrar de maneira bastante objetiva de que forma o segmento de tecnologia de aplicação absorveu as demandas apresentadas pelo setor nos últimos anos, e as respostas que serão apresentadas futuramente, preservando sempre a agricultura irrigada em patamares de respeito à utilização inteligente de água.

5.1 Introdução

A cada ano a agricultura nacional entra em níveis profissionais mais elevados e se assemelha mais ao ambiente empresarial. Um dos fatos que auxilia guiar os rumos da evolução nesse sentido pode ser entendido pelo aumento significativo dos custos de produção da lavoura. Os últimos 10 anos foram marcados por uma forte desvalorização cambial em relação à moeda norte americana, impactando diretamente nos três alicerces básicos para condução dos cultivos: Sementes x Defensivos x Fertilizantes. Essa correlação existe, pois ainda temos uma precificação muito dolarizada para os insumos do sistema de produção agrícola. Pelos gráficos a seguir fica evidente essa tendência. Como exemplo foram utilizados custos variáveis e operacionais de soja no Brasil (Figura 1) e a flutuação cambial do dólar perante o real (Figura 2) de 2007 a 2016.



Figura 1. Evolução dos custos operacionais e variáveis da soja no Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2016).

O cenário pós 2016 não foi diferente, e no ano de 2020 estivemos diante dos maiores patamares históricos, com a moeda americana chegando próximo dos R\$ 6,00. Praticamente nenhum segmento de mercado permaneceu alienado a essa tendência. Conduzir com sucesso lavouras de altas produtividades está cada vez mais desafiador e

financeiramente oneroso. Partindo dessa ótica, esse impacto macroeconômico parece ter alterado a sensibilidade ao risco na atividade agrícola e refletiu diretamente na forma como os agricultores estão investindo seu capital. Conviver com riscos sempre foi realidade dos produtores rurais, porém os altos níveis de capital necessários hoje para plantar e colher, alteram a percepção e redirecionam os investimentos às tecnologias que garantam mais segurança de safra.



Figura 2. Variação cambial. Dólar frente ao Real (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2016).

Dentre os diversos fatores que convergem para instabilidade nos resultados agrícolas, o domínio das práticas agrônômicas sempre se destaca como essencial. Porém independentemente de esforços e do nível de conhecimento dessa ciência, o padrão de produtividade será sempre melhor explicado por fatores abióticos como a temperatura, luz e água - sendo esse o trinômio chave nas equações de captação de energia e desenvolvimento fisiológico das plantas. Mesmo em situações de alto nível tecnológico e organização gerencial, a resultante econômica no campo estará sempre à mercê dos rigores meteorológicos. Cerca de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo se deve a variações de clima ao longo do ciclo das culturas, especialmente nas de sequeiro, sendo esse então um fator decisivo no sucesso ou no fracasso das safras e do agronegócio como um todo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Analisando agora pontualmente as variáveis meteorológicas, a **temperatura** é um recurso que até hoje, não é passível de manejo ou manipulação, estando o cultivo em condições normais de campo (em cultivo não protegido). Da mesma forma poderíamos falar de **luminosidade**, porém fatos recentes colocaram esse tema em discussão na comunidade científica, avaliando as possibilidades de se proceder com aplicações suplementares de radiação fotossintética artificial em larga escala, porém ainda sem resultados substanciais. Já no caso da **água**, essa sim é uma prática já dominada pela ciência agrônômica, sendo uma das tecnologias que mais se desenvolve no que tange as práticas de segurança de safra no Brasil. Ter a habilidade e a capacidade de intervir artificialmente no regime hídrico, altera drasticamente o risco da atividade agropecuária.

A realidade de um produtor irrigante é totalmente diferente quando comparada a um produtor em sequeiro. Eliminar a variável hídrica da equação de produtividade é um condicionante não somente do nível de insumos que serão aplicados no ciclo, como também o tipo de cultivo conduzido. Lavouras irrigadas são os ambientes onde as mais altas tecnologias são implementadas, afetando diretamente em toda a cadeia de fornecimento do agronegócio. Com a percepção alterada, o agricultor se sente mais confortável a incrementar o nível de intensificação, objetivando atingir produtividades máximas. Na mesma linha de raciocínio, observamos cultivos específicos como alho, cebola e batata - conhecidos por seu alto valor agregado, serem conduzidos em escala

comercial apenas sob a segurança de um sistema de irrigação. Uma lavoura de alho por exemplo, possui custos de implantação e condução 15 - 20 vezes maiores do que uma lavoura de soja. Sendo assim, a quebra de safra por escassez hídrica em um ambiente desse é muito mais impactante.

Como resultado disso, os últimos 10 anos foram marcados por um significativo crescimento na aquisição de sistemas de irrigação, com destaque para os sistemas mecanizados (pivôs centrais) e sistemas localizados (gotejamento). A partir de 2010, sistemas de irrigação incrementaram expansão a uma taxa acima de 150 mil hectares por ano, totalizando um crescimento de mais de 2 milhões de hectares nesse período. Esse número corresponde a 50% da expansão que tivemos anteriormente em um prazo de 49 anos. Pelo histórico de acompanhamento de 1960 até 2009, tinha-se conhecimento de um acumulado de algo em torno de 4 milhões de hectares (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2016). Com esses números fica evidente notar a expressividade desse tipo de tecnologia no contexto agrícola, ao mesmo passo que traçamos otimismo ao futuro.

Tabela 1. Evolução da área irrigada, crescimento anual total (CAT, ha ano⁻¹) e área total (AT, ha), dos sistemas de irrigação no Brasil no período de 2000 a 2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2019).

Área total irrigada por ano (ha ano ⁻¹)							
Tipo	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Pivô Central	47.320	50.540	57.820	59.500	47.600	26.600	17.500
Carretel	25.000	29.000	30.000	30.000	22.500	21.000	30.000
Convencional	16.200	15.300	14.650	17.500	15.000	15.000	15.000
Localizada	30.000	33.000	37.000	40.000	38.000	35.000	30.000
CAT	118.520	127.840	139.470	147.000	123.100	97.600	92.500
AT	3.068.480	3.196.320	3.335.790	3.482.790	3.605.890	3.703.490	3.795.990

¹ Histórico até 1999: 2.949.960 ha.

Tabela 2. Evolução da área irrigada, crescimento anual total (CAT, ha ano⁻¹) e área total (AT, ha), dos sistemas de irrigação no Brasil no período de 2007 a 2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2019).

Área total irrigada por ano (ha ano ⁻¹)							
Tipo	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Pivô Central	19.600	49.000	49.500	52.000	57.750	84.000	126.000
Carretel	30.000	30.000	25.000	30.000	32.500	32.500	32.500
Convencional	16.500	20.000	17.000	25.000	29.500	35.400	40.710
Localizada	40.000	47.000	40.000	50.000	56.000	60.480	72.576
CAT	106.100	146.000	131.500	157.000	175.750	212.380	271.786
AT	3.902.090	4.048.090	4.179.590	4.336.590	4.512.340	4.724.720	4.996.506

A Tabela 1 ilustra esse crescimento e os dados são fruto de análises da Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação, órgão da Associação Brasileira de Máquinas e

Implementos Agrícolas (ABIMAQ), no qual estão presentes os principais *players* responsáveis por esse segmento.

Tabela 3. Evolução da área irrigada, crescimento anual total (CAT, ha ano⁻¹) e área total (AT, ha), dos sistemas de irrigação no Brasil no período de 2014 a 2020 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, 2019).

Tipo	Área total irrigada por ano (ha ano ⁻¹)						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Pivô Central	102.000	78.000	91.000	94.000	92.000	97.500	117.000
Carretel	10.500	6.000	18.000	14.000	13.750	12.500	16.250
Convencional	28.497	28.000	31.000	31.000	31.000	31.000	37.200
Localizada	79.834	75.000	75.000	64.000	64.000	68.500	78.775
CAT	220.831	187.000	215.000	203.000	200.750	209.500	249.225
AT	5.217.337	5.404.337	5.619.337	5.822.337	6.023.087	6.232.587	6.481.812

É fato que a agricultura irrigada é vista como uma ferramenta indispensável na política de desenvolvimento do agronegócio brasileiro, tamanha é a segurança produtiva de alimentos, fibras e energia, que esse segmento traz ao país. A tecnologia de pivô central ganha destaque nesse contexto pois talvez seja o sistema de entrega de água que mais se adapta às condições agrícolas brasileiras. Pelos dados acima, é possível observar a representatividade desses sistemas na expansão. No ano de 2019, por exemplo, representou 46% do crescimento total de área irrigada. Órgãos públicos como Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico em conjunto com Embrapa, também acompanham de perto essa evolução. Imageamento de satélites mostram um volume total de mais de 18 mil máquinas instaladas por todo território nacional até 2016 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2016). É evidente que essa expansão ocorre devido a uma grande aceitação por parte do produtor rural a esse método de irrigação. Na sequência alguns pontos serão melhor explorados, justamente para ressaltar as grandes vantagens operacionais de um pivô central e de que forma a tecnologia de aplicação se aperfeiçoou para garantir que esse crescimento acontecesse de uma maneira sustentável.

5.2 Pivô central: dinâmica e operacionalidade

Um país de dimensões continentais com grande parcela de seu território locado entre os trópicos, viabiliza muitas opções para exploração de diferentes cultivos e amplia as janelas de oportunidade da terra. Para operar com pluralidade de cultivos é necessário flexibilização e dinâmica operacional. Sendo assim, é desejável que o sistema de irrigação impacte minimamente na mecanização das operações de plantio, colheita, preparo de solo, rotação de culturas e sistematizações em geral. O equipamento de irrigação pivô central agrega justamente essa autonomia. Partindo de uma visada holística, vemos uma tubulação aérea que passa por cima da lavoura transportando água por todo o raio plotado. Temos então uma resultante de baixa relação equipamento/superfície de solo irrigada. Um pivô de 565 metros com tubulação de 6.5/8", ocupa 0,01% de uma área irrigada de 100 hectares. Lembrando também que essa ocupação não é fixa pois o sistema possui torres móveis. Podemos então concluir que a irrigação mecanizada ocupa espaço mínimo da zona de operação agrícola.

Um outro ponto que corrobora para adesão desse tipo de tecnologia, vai de encontro à conceitos econômicos e a variação dos preços das commodities agrícolas.

Para ilustrar esse pensamento, tomemos por exemplo um irrigante - produtor/fornecedor de cana-de-açúcar para determinada usina sucroalcooleira. Se porventura esse produtor rural vislumbrar condições mais interessantes para exploração de grãos por uma melhor remuneração futura, seu sistema de irrigação em nada impactará a transição do cultivo. Não haverá limitação nenhuma em relação às diferenças de espaçamento e manejo das culturas selecionados.

O grande diferencial do pivô central é trabalhar a água em uma simulação de chuva por toda lavoura, permitindo ao agricultor ilimitadas opções de atividades agropecuárias. Caso esse mesmo produtor opte por produzir carne ou leite sob regime de pastejo intensivo, nenhuma preocupação haverá em relação ao conflito animal x sistema de irrigação nesse processo. A facilidade com que os cultivos podem ser alterados/rotacionados em uma área de irrigação é de extrema valia, pois a todo momento observamos variações expressivas de preços, principalmente em cultivos nacionais, como feijão. Essa cultura deve ser destacada pois é responsável por grande parte dos investimentos em irrigação mecanizada no Brasil. O feijão possui uma particularidade pois não é enquadrado como uma commodity internacional. Diferente de outros grãos (soja e milho), é um produto negociado alienado a lógica da bolsa de valores. Seus preços são facilmente volatilizados e nos últimos anos renderam como uma excelente opção aos irrigantes. Podemos confirmar esse fato quando observamos o feijoeiro ser conduzido justamente nos períodos de menor regime pluviométrico, nos principais polos de irrigação do Brasil - São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Bahia.

5.3 Pivô central: tecnologia de aplicação

Para acompanhar essa crescente demanda, todo o setor de irrigação busca sempre aperfeiçoar suas tecnologias e oferecer aos irrigantes soluções inteligentes que minimizem utilização de água e energia. Importante citar nesse momento o tamanho do conglomerado agroindustrial da irrigação operante no setor. Diversos agentes atuam nesse segmento, agregando expertise em várias esferas da engenharia. Bombeamento, adutora e pivô formam um conjunto de elos que conectam água e garantem o transporte até área a ser irrigada. Durante todo evento de transporte a água permanece em um conduto fechado, pressurizado e protegido. A linha final desse caminho termina em um dispositivo muito importante da estrutura da irrigação: os aspersores. Esses elementos são peças chaves responsáveis pela última etapa do processo. É justamente nesse momento em que todo volume de água sai do ambiente pressurizado e deve ser fracionado em gotas objetivando o contato com solo e tornando o recurso hídrico disponível ao sistema radicular. A distância entre o aspersor e o solo embora pequena em relação a todo caminho já percorrido desde a captação, é momento mais delicado e complexo de todo trajeto. Por não estar mais protegido, o volume de água torna-se vulnerável ao ambiente, podendo sofrer com a baixa umidade relativa do ar, incidência de ventos e condições atmosféricas em geral. Cabe ao sistema de aspersão projetar o volume de água em gotas com tamanho e distribuição adequados. Caso o fracionamento aconteça em formato de gotas muito pequenas, estará essa aplicação susceptível a perdas por arraste e evaporação antes que a água toque o solo. Caso a projeção aconteça com uma balística de gotas mais pesada, haverá maior garantia de contato com solo, porém riscos de compactação aumentam e com isso outros prejuízos assumem forma. O impacto excessivo de gotas pesadas pode gerar um selamento da camada superficial do solo, minimizando a capacidade de infiltração e gerando um fenômeno conhecido por *run-off*, no qual a água escorre pelo terreno ao invés de infiltrar pelos macroporos. Além disso, o choque de gotas pesadas pode também gerar danos

severos aos *seedlings* de plantas mais sensíveis, ou prejudicar estruturas de plantio, como no caso dos canteiros, bastante comuns em cultivos de batatas e cenouras.

Ao longo do processo de amadurecimento da ideia de que a irrigação mecanizada era uma boa tecnologia de irrigação, obviamente houve a necessidade de focar na parte estrutural da máquina, tendo em mente que o pivô pode ser visto como um implemento agrícola, da mesma forma que um trator, pulverizador ou semeadora. Os fabricantes no Brasil tiveram que exercitar muito a abordagem em cima de suas qualidades eletromecânicas, matéria prima e espessura das chapas metálicas utilizadas na tubulação. Como qualquer outro implemento agrícola, uma máquina de irrigação obviamente requer manutenção e naturalmente esse tema foi alvo nas tratativas comerciais com os produtores rurais. Sendo assim, por muitos anos o sistema de aspersão foi colocado em um segundo plano.

Embora aspersores e reguladores de pressão possam parecer produtos simples oriundos da injeção plástica, existe ali um alto nível de detalhamento técnico empregado para manter boa qualidade em um item que estará a todo tempo exposto ao ambiente e aos intemperes climáticos, além de choques mecânicos e desgaste pela aplicação de água e outros sólidos em solução como: fertilizantes, dejetos, areia e outros resíduos. Comparado com toda a estrutura da máquina, que é feita de ligas metálicas em sua matéria prima, os aspersores devem embarcar tecnologia de última ponta, com polímeros especiais, garantindo funcionamento justamente nessa etapa de tamanha responsabilidade – a aplicação da água no solo.

Essa especificidade pode ter auxiliado a manter um foco reduzido na tecnologia de aplicação, justamente por possuir um portfólio reduzido de *players* especializados na fabricação desses componentes. Esse nível de tecnologia de produção é dominado hoje por basicamente 3 multinacionais. Duas delas localizadas em território norte americano e a outra em continente europeu (Áustria). Além de estarem distantes geograficamente das realidades brasileiras, as 3 empresas possuem algo em comum, que seria o fato de terem sua origem como negócios familiares e atividade local em um primeiro momento. Naturalmente ao longo do tempo, expandiram internacionalmente, e da mesma forma que outras empresas estrangeiras do agronegócio, identificaram no Brasil um mercado próspero devido à grande aptidão para atividades agropecuárias.

Embora um pouco atrasado, temos atualmente no Brasil um ambiente muito fértil para evoluir nesse tópico de tecnologia de aplicação. Muito disso é devido ao aumento de interesse do mercado consumidor em selecionar os melhores dispositivos que irão equipar suas máquinas. Tanto os fabricantes de pivô, como os irrigantes em si, possuem uma grande preocupação na forma como a água está sendo distribuída na lavoura. Já existe um melhor entendimento que os aspersores devem ser enquadrados como os responsáveis na definição de eficiência do pivô central, independentemente da marca ou modelo do pivô.

A eficiência de um sistema de irrigação por pivô central é basicamente ditada por dois fatores, uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008). Essa última é capaz de refletir as perdas por evaporação e arraste pelo vento, durante o percurso da água entre os emissores e o solo.

Os aspersores específicos para utilização em pivô passaram por muitas alterações ao longo do tempo. Os pontos principais que sempre foram alvos de destaque consistiam nas características de raio de aplicação, padrão de molhamento e pressão de operação. Em relação ao raio, o mercado consumidor sempre demandou da indústria um emissor que projetasse sua aplicação com grandes alcances, tendo em vista aos níveis de recobrimento e sobreposição. Essa característica influencia diretamente nas

possibilidades de espaçamento e conseqüentemente no número de conjuntos emissores (regulador de pressão + aspersor) necessários a compor o mapa de aspersão. Quanto maior o raio de alcance, teoricamente melhor a sobreposição, possibilitando maiores espaçamentos e conseqüentemente menor investimento na quantidade de produtos a serem incluídos no orçamento do projeto. Esse conceito é herança dos sistemas de aspersão fixa, conhecido na indústria por *solid-set* - método de irrigação que é um dos mais antigos, onde são instalados aspersores dispostos de maneira a formar um layout esquadrejado na área. Por serem estruturas fixas, é de interesse que o espaçamento entre aspersores seja o maior possível, pois o número de estruturas instaladas determina a economicidade da instalação, além de minimizar problemas de operacionalização da área. Com isso, se desenvolveram no mercado emissores de impacto com alta pressão de operação (3 a 4 kgf cm⁻²), para atender essa demanda de longos espaçamentos. No início da história dos pivôs centrais, esses mesmos aspersores foram instalados e posicionados diretamente nas furações acima da tubulação. Logo se notou que essa aplicação estava longe de ser ideal, pois pela altura da máquina, o trajeto que a água deveria percorrer até chegar no solo seria muito grande, e a alta pressão gerava um índice de pulverização notável, resultando em deriva excessiva e baixa eficiência de aplicação. A partir daí, inúmeros outros dispositivos foram projetados para operar em tubos de descida (mangueira, tubos metálicos ou PEAD), baixando então altura de instalação para algo em torno de 1,5 a 2,0 metros em relação ao solo. Uma linha extensa de produtos foi apresentada ao mercado durante esse período, fato que também auxiliou a gerar dúvidas quanto ao melhor dispositivo a ser utilizado em cada condição de cultivo, solo e ambiente.

Um evento muito importante durante a evolução dos aspersores foi o desenvolvimento do dispositivo rotativo. Esse fato merece destaque pois realmente alterou a forma de fracionamento da água e sua aplicação. O aspersor rotativo foi projetado para utilizar a própria energia hidráulica e movimentar um disco defletor com ranhura. Essa tecnologia ganhou notoriedade na indústria da irrigação pois era visível os baixos índices de deriva e alta uniformidade de distribuição. Até o momento foi o mecanismo de aplicação de água que mais se assemelhou a distribuição natural da chuva. Em relação ao padrão de molhamento, o rotativo tem capacidade de aplicar água instantaneamente em 360 graus de maneira bastante uniforme, suavizando os índices de intensidade de precipitação. No Brasil esse modelo passou a ser mais utilizado em meados de 2010, fato esse que vai de encontro às análises apresentadas ao início desse capítulo. Assim é possível compactuar que a tecnologia de aplicação de água acompanhou de perto a rápida evolução da agricultura irrigada brasileira.

Outro ponto que merece destaque é a redução na necessidade de energia de operação. Enquanto os antigos aspersores de impacto necessitavam de pressões ao redor de 3 a 4 kgf cm⁻² para funcionar, os aspersores rotativos demandavam apenas 0,69 a 1,03 kgf cm⁻². Essa redução foi importante para tornar os pivôs centrais conhecidos por alta eficiência no uso de energia. Esse conceito continua ainda evoluindo e hoje temos produtos no mercado que operam com reguladores de pressão de 0,41 kgf cm⁻².

Esse quadro impacta de maneira significativa no consumo de energia, principalmente em máquinas de grande porte e alto uso de irrigação. As condições geográficas brasileiras permitem explorar irrigação com mais de 3000 horas por ano em regiões de latitudes mais baixas. Nessas mesmas regiões temos aptidão para implantar máquinas extensas, acima de 120 hectares, devido ao relevo ser bastante plano. Essa combinação entre tamanho dos pivôs e alto uso de irrigação demanda elevadas cargas energéticas. Talvez o Brasil seja um dos únicos países a utilizar sistemas de irrigação

nesses níveis, sendo então um campo que se diferencia e explora muito mais os limites de tecnologia disponíveis na indústria.

Conforme citado anteriormente, as características desejáveis para emissores sempre se fixaram muito em raio de aplicação, padrão de molhamento e pressão de operação. Porém com esses atributos já bem entendidos a engenharia de aplicação vislumbra hoje um tópico mais avançado, que embora evidente, foi muito pouco detalhado nesses últimos anos: balística e tamanho de gotas.

A indústria de aspersores sempre tocou nesse tema de maneira indireta, limitando-se em apenas conceituar tamanho de gotas pequenos, médios ou grandes, porém nunca pontuando numericamente esses parâmetros. Se lembrarmos que a eficiência de aplicação é dada pela quantificação das perdas por arraste e evaporação, é necessária então maior compreensão de qual a tolerância de determinados diâmetros de gota em relação a determinadas velocidades de vento. Nessa mesma linha de raciocínio, se os espectros de gotas forem bem conhecidos, seria possível realizar previsões mais assertivas da energia de impacto da água no solo de acordo com altura de instalação dos emissores. Esses números seriam de extrema valia para determinar com clareza os parâmetros ideais de aplicação, de acordo com cada tipo de solo, e aliar práticas agrônômicas como aumento da cobertura de palhada, caso necessário.

Embora alguns estudos já tenham sido direcionados nesse sentido desde a década de 60, a base de literatura ainda é muito escassa. Isso se deve ao fato de a metodologia para mensuração do espectro de gotas ser algo complexo. Dentre essas metodologias podemos citar o método da farinha, que consiste na captura de gotas em coletores contendo uma camada peneirada de farinha de trigo, e posterior separação dos grânulos que serão secos e medidos para determinar os diferentes tamanhos de gotas capturados. Outro método de referência utiliza tecnologia eletrônica, onde as gotas cruzam um feixe de laser horizontal e a sombra projetada em um dispositivo semicondutor infere o tamanho da gota (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

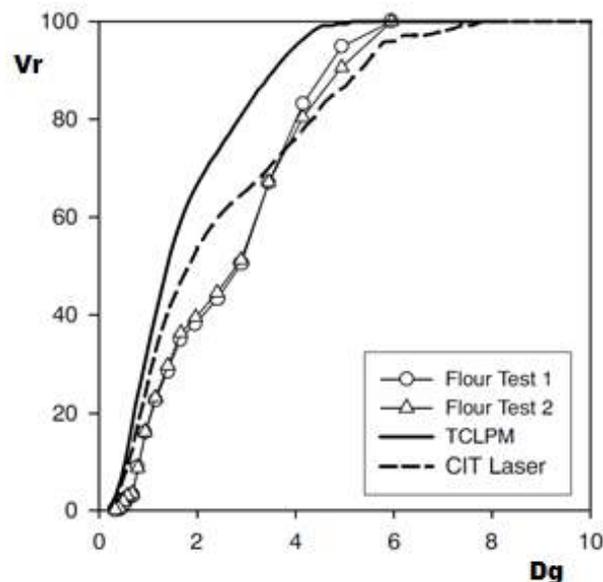


Figura 3. Espectro de gotas, volume relativo (V_r , %) em função do diâmetro de gota (D_g , mm), para aspersor em 10,5 mca (15 psi) e bocal 6,4 mm. Metodologias: métodos da farinha (*Flour Test 1* e *Flour Test 2*) e via Laser (*TCLPM* e *CIT Laser*) (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

Embora exista um abismo tecnológico entre ambos métodos para mensuração de gotas, King, Winward e Bjorneberg (2010) citam que os resultados ainda podem variar muito de acordo com modelo e condição de operação do aspersor avaliado.

Contudo, os esforços da comunidade científica internacional no âmbito desse tema, destacaram um conceito bastante aplicável: não existe no momento da distribuição de água, um tamanho definido de gotas, e sim uma população ou espectro de partículas de diferentes tamanhos. Essa amplitude então definirá o quão padronizado determinado aspersor tem em fracionar o volume de água aplicado. Na Figura 3 temos um exemplo dessa variação, com um aspersor operando em pressão de 15 PSI, analisado sob diferentes metodologias, sendo dois deles via método da farinha (*Flour Test 1 e Flour Test 2*) e dois via Laser (*TCLPM e CIT Laser*).

Excluindo-se a variação entre as diferenças metodológicas, os números corroboram para uma série de conclusões de interesse do setor de irrigação. O primeiro vai de encontro às porcentagens de gotas pulverizadas - menores do que 0,5 mm de diâmetro. Mesmo que ainda não haja uma correlação entre o tamanho de gota e a intensidade de perturbação por rajada de vento, pode-se inferir que gotas menores que 0,5 milímetro dificilmente atingirão o alvo solo. Sendo assim, é desejável que a curva de distribuição de gotas seja menos inclinada em seu início, mostrando a resiliência que um aspersor tem em controlar o efeito de pulverização. Gotas menores que 0,5 mm são compatíveis com espectro de gotas de um pulverizador agrícola. Porém, do ponto de vista da engenharia de irrigação, não são interessantes visando boa eficiência de aplicação. A identificação dessas frações, serão provavelmente indicadores técnicos a serem agregados em catálogos pela indústria, da mesma forma que temos hoje raio de alcance em diferentes bocais.

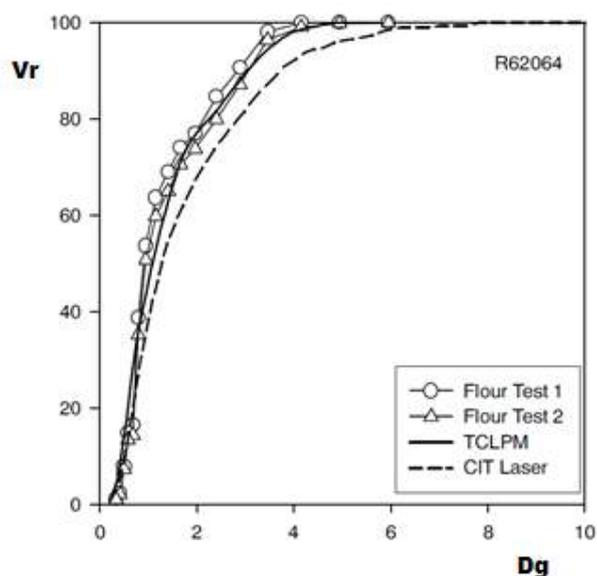


Figura 4. Espectro de gotas, volume relativo (V_r , %) em função do diâmetro de gota (D_g , mm), para aspersor em 17,5 mca (25 psi) e bocal 6,4 mm. Metodologias: métodos da farinha (*Flour Test 1 e Flour Test 2*) e via Laser (*TCLPM e CIT Laser*) (KING; WINWARD; BJORNEBERG, 2010).

Uma outra questão que pôde ser evidenciada pela Figura 3, seria a amplitude do espectro que determinado aspersor tem em produzir. No caso apresentado, temos um range que vai de 0,5 a 4,0 mm. A partir do momento em que existir uma priorização de determinado diâmetro médio de gotas, o aspersor deverá buscar projetar o maior

volume possível de gotas desse tamanho e evitar ao máximo as extremidades, tanto inferiores (gotas pequenas) quanto superiores (gotas grandes).

King, Winward e Bjorneberg (2010) relatam com clareza um outro fenômeno clássico que ocorre durante funcionamento de emissores ao se variar a pressão de trabalho. Maiores pressões injetadas no dispositivo aspersor tendem a aumentar a fração pulverizada de água e, por consequência, reduzir o potencial de eficiência de aplicação. Em contra partida, pressões menores tendem a aumentar a porcentagem do volume de água distribuído, em diâmetros maiores de gotas. Esse é um resultado bastante esperado, porém pouco avaliado pela base científica. Na Figura 4, temos o mesmo aspersor, operando agora com 25 psi.

Comparado com a Figura 3, vemos um aumento significativo na angulação da curva. Neste caso, temos mais de 75% do volume de água sendo distribuído em gotas menores do que 2 mm. Se for identificado por exemplo, que essa fração de gotas não se comporta bem com velocidades mínimas de vento, com certeza essa combinação, aspersor x regulador de pressão, não será interessante, pensando em garantir eficiência de aplicação.

A sequência normal de um aprofundamento desses estudos seria agora avaliar quais os limites técnicos para priorizar gotas maiores, objetivando aumentar eficiência de aplicação. Sem dúvida existe um limiar estreito entre o risco de perda de água por vento x impacto de água no solo, porém pode ser mais sensível ao irrigante as perdas de água durante o processo de irrigação, do que os danos relativos à impacto de água no solo. Se for esse o caminho, talvez a engenharia de aspersores objetive projetar sistemas cada mais preparados para direcionar o espectro de gotas em tamanhos maiores, sabendo que esses serão amortecidos via proteção natural da palhada, e lembrando ainda, que plantio direto é prática de rotina dos agricultores brasileiros. Além disso, existem sistemas alternativos para se reduzir intensidade de precipitação e impacto de água no solo. Um exemplo é ilustrado na Figura 5, na qual temos um sistema de ampliação de espaçamento perpendicular à tubulação. Essa estratégia aumenta a superfície de contato de solo, suavizando a distribuição e minimizando impactos no momento da aplicação.



Figura 5. Expansor implantando em pivô central para reduzir intensidade de precipitação.

Esse tipo de estrutura minimiza um outro efeito secundário, bastante negligenciado, que seria a colisão de gotas. O fenômeno ocorre principalmente quando

os aspersores trabalham muito próximos uns dos outros, seja por uma duplicação ou por um espaçamento de outlet reduzido. O choque entre as gotas reduz ainda mais o diâmetro médio, chegando próximo a uma névoa, sendo então facilmente carregada pelo vento. Alternativas bastante simples podem ser utilizadas para minimizar esse efeito e preservar o padrão original de gotas produzido pelo emissor. A própria estrutura da máquina pode ser utilizada como suporte para as mangueiras e assim espaçar os aspersores. No caso da Figura 5, temos um arranjo um pouco mais complexo, com cabos de aço esticados pelo lance em balanço. Porém, é bastante comum a utilização dos tirantes nos vãos/lances, para ajudar nessa função.

A avaliação de tamanho de gotas médio será um tema bastante pertinente nos próximos anos e sem dúvida será um indicador de grande responsabilidade ao se falar sobre eficiência em irrigação mecanizada. A indústria de aspersão terá papel fundamental na difusão desses dados que já existem, e dos que venham ainda a ser produzidos via ambiente acadêmico ou experiência de campo. Esse é mais um caso clássico onde as demandas crescentes do setor acabam moldando os rumos de novos focos de pesquisa. O segmento de irrigação é uma fronteira agrônômica relativamente jovem, quando comparado a outros departamentos das ciências agrárias.

5.4 Considerações finais

Importante lembrar que este capítulo objetivou discorrer apenas sobre uma das etapas da irrigação. Se contabilizarmos o que ainda venha a avançar nas esferas de manejo da irrigação, automatizações e monitoramento remoto, colocamos a irrigação em um patamar de grandes horizontes a serem explorados. Nada mais se esperaria de uma ciência tão nobre quanto àquela que utiliza o bem mais precioso da humanidade: a água.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil 2014. Relatório síntese, ANA, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, Câmara Setorial de Irrigação. Atualização de área irrigada no Brasil. Abimaq, 2019.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8 Ed. Viçosa: Ed. UFV, 625p. 2008.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Compêndio de Estudos Conab**. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília: Conab, 2016.
- KING, B.A.; WINWARD, T.W.; BJORNEBERG, D.L. **Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving spray-plate sprinklers**, 2010.

CAPÍTULO 6

6 PROJETO E EXECUÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA

Jarbas Honorio de Miranda, Laura Elizabeth Christianson e Luciano Alves de Oliveira

Resumo

A drenagem de terras agrícolas tem por objetivo principal a retirada do excesso de água dos solos, superficialmente e/ou subterrâneo. De maneira superficial, visando o controle do escoamento superficial e subsuperficialmente, visando o controle da profundidade do lençol freático (LF). Para se alcançar esses objetivos, um dos primeiros passos e desafios é a definição da fonte do excesso de água e depois a correta aplicação das técnicas de drenagem. Há de se ressaltar que tais ações devem seguir a legislação que assegura a utilização dessas áreas. Aspectos atuais como modelagem computacional e utilização de técnicas para redução de contaminação ambiental de águas subterrâneas, vêm sendo aplicados em termos mundiais. Com isso, busca-se com a drenagem de terras agrícolas, o aproveitamento e utilização de novas áreas para a produção agrícola, bem como, proteção de áreas naturais evitando problemas de erosão, bem como, de contaminação de águas subterrâneas.

6.1 Introdução

A drenagem de terras agrícolas tem por objetivo retirar o excesso de água dos solos, permitindo uma melhoria da aeração e das propriedades físico-químicas desses solos, tornando-os mais aptos e efetivos para o desenvolvimento e produção de cultivos. Também, auxilia na lixiviação de sais do solo, controlando problemas de salinidade em algumas regiões e situações. Portanto, de maneira simples, quando a drenagem natural do solo não é suficiente para torná-lo propício ao cultivo agrícola, recomenda-se o uso de métodos de drenagem artificial.

Em alguns levantamentos estatísticos, em termos mundiais, a drenagem é necessária para a produção agrícola em cerca de 25% das terras cultiváveis nos Estados Unidos e Canadá (PAVELIS, 1987; SHADY, 1989) e cerca de 33% das terras agrícolas requerem drenagem (SMEDEMA *et al.*, 2004). Cabe ressaltar que sem a técnica da drenagem, não seria possível a agricultura em muitas dessas terras. Com o uso da drenagem, essas áreas estão entre as mais produtivas do mundo.

6.2 Drenagem de terras agrícolas

6.2.1 Considerações iniciais

Os projetos de drenagem que vêm sendo executados na região sudeste do Brasil têm como objetivo incorporar áreas (terras baixas) ao processo produtivo, às quais apresentam drenagem natural deficiente. Na maioria desses projetos, aspectos importantes do sistema de drenagem, tais como o espaçamento entre drenos, muitas vezes vêm sendo definidos não apenas pela aplicação de equações de drenagem, às quais muitas vezes obtêm-se valores de espaçamento entre drenos bem menores do que aqueles aplicados na prática. Ou seja, em sua maioria, os espaçamentos utilizados em condições de campo, tendo como base a experiência prática do projetista, têm sido

consideravelmente maiores do que seriam caso fossem obtidos pelas equações de espaçamento entre drenos e critérios de drenagem tradicionais (MIRANDA, 1997).

Segundo Duarte (1997), ao que tudo indica, os critérios conservadores de dimensionamento fornecem o espaçamento que propicia a produtividade máxima das culturas, mas nem sempre retratam o dimensionamento mais econômico.

De certa forma, os projetos de drenagem agrícola são divididos em dois grupos: drenagem subterrânea e drenagem superficial. O primeiro grupo busca estabelecer um controle do rebaixamento do lençol freático (LF), adequando uma situação ideal à produção agrícola e o segundo grupo procura facilitar a retirada da água da superfície do solo evitando problemas de erosão (Figura 1).

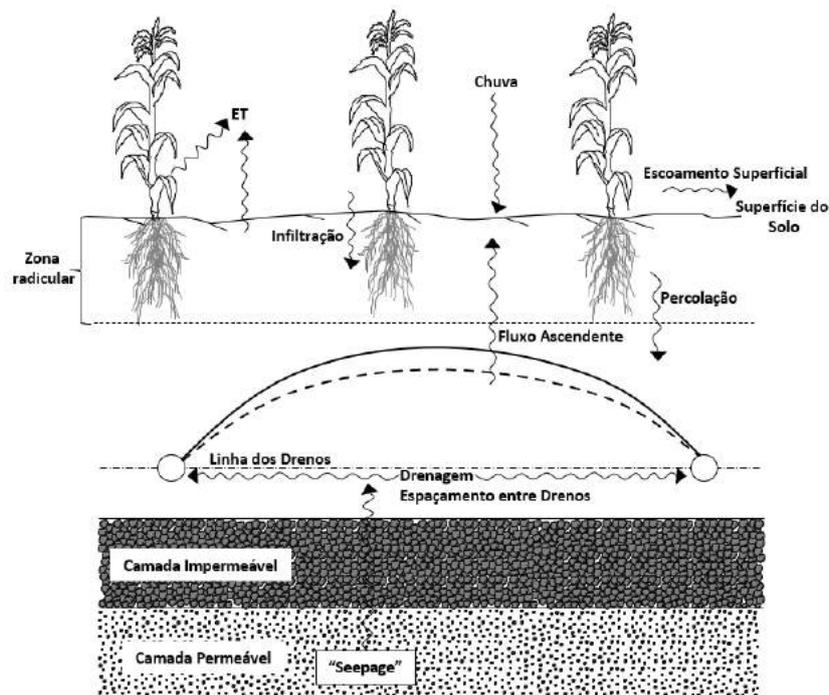


Figura 1. Componentes físicos do ambiente agrícola e elementos de drenagem agrícola.

Os projetos de drenagem agrícola possuem os seguintes objetivos principais: (i) Aeração do sistema radicular mediante o rebaixamento do LF: retirando o excesso de água, tanto da superfície do solo quanto da zona radicular, em função de um tempo ideal para que a planta tenha condições de realizar as trocas gasosas entre a zona radicular e a atmosfera, (ii) Trafegabilidade de máquinas: trazer a umidade do solo a um ponto ideal, de modo que se torne possível o tráfego de máquinas agrícolas para realizar o preparo do solo, (iii) Controle da erosão: trata-se do principal objetivo da drenagem superficial em áreas com declive em regiões úmidas. O sistema de drenagem deve garantir com que a água se infiltre através da superfície do solo ou seja retirada da área, buscando a menor perda de solo (processos erosivos), e (iv) Controle da salinidade: situação muito característica em regiões áridas e semiáridas, onde se pratica irrigação, nas quais a drenagem busca evitar o fluxo ascendente vindo do LF para a zona radicular e permitir a retirada de sais provenientes da aplicação, pela irrigação, mediante lâminas de lixiviação.

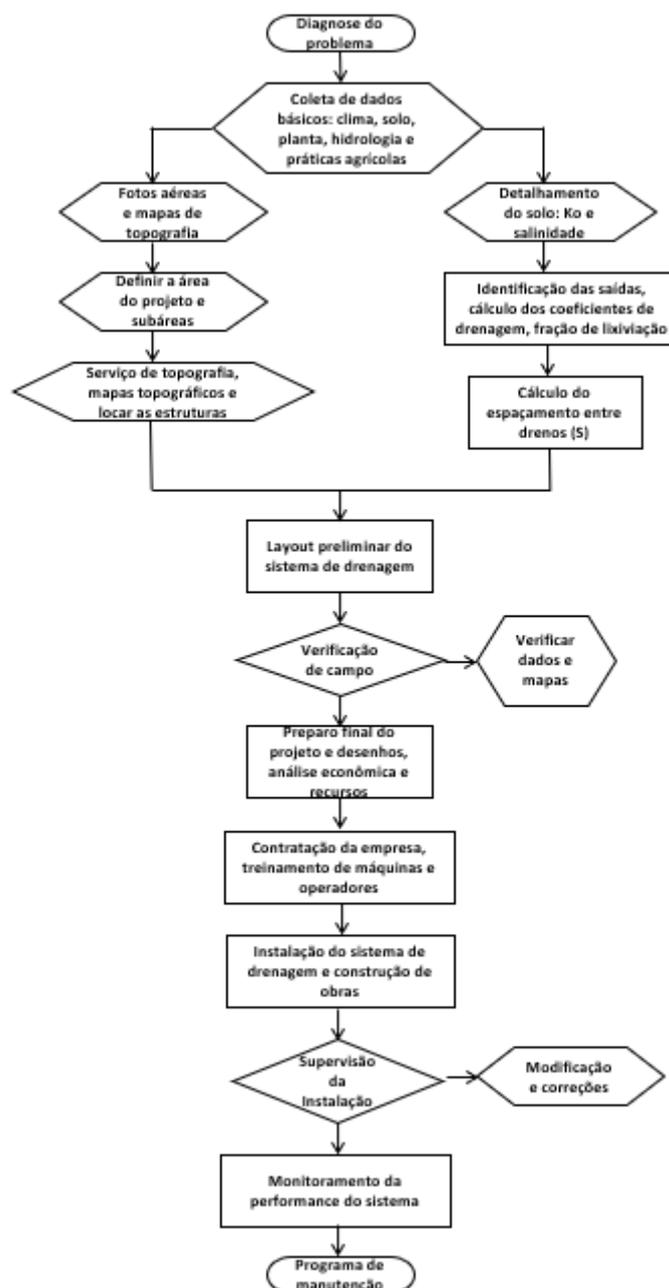


Figura 2. Fluxograma de atividades na elaboração de projetos de sistemas de drenagem (SKAGGS; VAN SCHILFGARDE, 1999).

Um dos primeiros passos de um projeto de drenagem é a definição da fonte do excesso de água (dependentes do tipo de solo, clima, comportamentos hidrogeológicos e práticas de irrigação) e dessa forma, definir quais serão os objetivos. Dentre as propriedades físico-hídricas do solo, a condutividade hidráulica (aquela que expressa a “facilidade” com que a água se desloca no solo) é o principal fator que influencia na dinâmica da água no solo. Diferentes métodos e considerações para sua determinação e aplicação são levadas em conta para se chegar a um valor representativo e dessa forma, auxiliar o projetista a desenvolver a melhor situação para propiciar um menor custo e um maior retorno em termos de produtividade. Portanto, o principal objetivo de um projeto de drenagem em regiões úmidas é o controle da profundidade do LF, de maneira que a chuva não cause danos de falta de oxigenação para as plantas e possa

propiciar possibilidade de tráfego de máquinas. Um objetivo subsequente é a lixiviação de sais e/ou manutenção correta de nutrientes na zona radicular, tornando-os disponíveis às plantas ao longo do tempo. Assim sendo, busca-se resolver tanto problemas de ordem econômica quanto problemas de aspectos ambientais. Segundo Skaggs *et al.* (1999) o seguinte fluxograma (Figura 2) define bem as etapas do planejamento e layout para implementação de projetos de drenagem.

6.2.2 Aspectos de legislação

Para se obter o licenciamento para um projeto de exploração dessas áreas (terras baixas) deve-se seguir um roteiro e aspectos legais. Segundo o Código Florestal Brasileiro (Lei 12.727, 17 de outubro de 2012) trata da proteção da vegetação nativa em território nacional, incluindo disposições sobre faixas de uso permitidas e restrições ambientais para empreendimentos ou atividades agrícolas em áreas de preservação permanente (APPs) ou reserva legal (RL).

As APPs são definidas na lei como área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Já a RL é definida como sendo uma área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa.

No corpo da referida Lei são especificadas as faixas marginais a serem destinadas a APP às margens de qualquer curso d'água natural perene ou lago/lagoa. A largura mínima dessas faixas, a partir da borda da calha do leito regular, varia de acordo com a largura do curso d'água em questão conforme o seguinte: 30 m, para os cursos d'água de menos de 10 m de largura; 50 m, para os cursos d'água que tenham de 10 m a 50 m de largura; 100 m, para os cursos d'água que tenham de 50m a 200 m de largura; 200 m, para os cursos d'água que tenham de 200 m a 600 m de largura e 500 m, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros.

Para o caso de lagos e lagoas, a largura mínima dessas faixas varia de acordo com a área superficial do lago/lagoa, conforme o seguinte: 100 m, em zonas rurais, exceto para o corpo d'água com até 20 ha de superfície, cuja faixa marginal será de 50 (cinquenta) metros e 30 m, em zonas urbanas.

A Lei também prevê faixas de APP no entorno de olhos d'água (afloramento natural do lençol freático) e nascentes (afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d'água), as quais devem ter raio mínimo de 50m. São também consideradas áreas obrigatoriamente destinadas a APP os seguintes casos: encostas com declividade superior a 45°, restingas, manguezais, bordas de chapadas (faixas mínimas de 100 m), topos de morros, montanhas ou serras (com ao menos ao menos 100m de altura e inclinação maior que 25°), áreas com altitude maior que 1800 m e a faixa marginal de veredas (faixa mínima de 50m). As áreas destinadas a RLs não se misturam com as APPs, e tem dimensões mínimas distintas conforme sua localização. Se a propriedade se localiza dentro da Amazônia Legal (estados do Acre, Pará, Amazonas, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e as regiões situadas ao norte do paralelo 13° S, dos estados de Tocantins e Goiás, e ao oeste do meridiano de 44° W, do Estado do Maranhão) tem área mínima de RL de:

80%, no imóvel situado em área de florestas; 35%, no imóvel situado em área de cerrado; 20%, no imóvel situado em área de campos gerais.

Já propriedades que se encontram fora da Amazônia legal devem apresentar área mínima de RL de 20% de sua área total. A Lei prevê algumas exceções em que a área mínima destinada a RL em propriedades na Amazônia legal em área de florestas pode ser reduzida para até 50%.

Nas áreas que segundo os critérios estabelecidos no código devam ser destinadas a APP, que já exista atividade sendo exercida (que comprovem já estar consolidadas até 22 de julho de 2008), a recomposição das faixas marginais obedece a critérios específicos. Áreas que não se encontravam consolidadas até esta data deverão ser recompostas seguindo os valores gerais apresentados no código.

Os critérios para áreas consolidadas no entorno de cursos d'água são demonstrados a seguir. Todas as faixas devem ser contadas da borda da calha do leito regular, independentemente da largura do curso d'água: Para os imóveis rurais com área de até 1 módulo fiscal: faixas marginais em 5 m. Para os imóveis rurais com área entre 1 e 2 módulos fiscais: faixas marginais em 8 m. Para os imóveis rurais com área entre 2 e 4 módulos fiscais: faixas marginais em 15m. Para os imóveis rurais com área superior a 4 módulos fiscais: faixas marginais entre 20 m e 100 m.

Nos casos de áreas rurais consolidadas em Áreas de Preservação Permanente no entorno de nascentes e olhos d'água perenes, será obrigatória a recomposição de faixas marginais de no mínimo 15 m.

Para os imóveis rurais que possuam áreas consolidadas em APP no entorno de lagos e lagoas naturais, a faixa marginal deve ter largura mínima de: 5m, para imóveis rurais com área de até 1 (um) módulo fiscal; 8m, para imóveis rurais com área entre 1 e 2 módulos fiscais; 15m, para imóveis rurais com área entre 2 e 4 módulos fiscais e 30m, para imóveis rurais com área superior a 4 módulos fiscais.

Para os imóveis rurais que possuam áreas consolidadas em veredas, a largura mínima das faixas marginais será de 30m, para imóveis rurais com área de até 4 módulos fiscais e 50m, para imóveis rurais com área superior a 4 módulos fiscais.

6.2.3 Seleção do método de drenagem

Os sistemas de drenagem são classificados como sendo de drenagem subterrânea ou superficial. Os métodos de drenagem superficial envolvem nivelamento da superfície, gradeamento, terraceamento e abertura de valetas. A drenagem superficial é especificamente necessária em áreas de encosta, ribeirinhas e para prevenção de escoamento superficial, conseqüentemente, rebaixamento do LF e prevenção de inundação de áreas, prejudicando, nesse sentido, os cultivos. Porém, há algumas desvantagens na drenagem superficial, tais como a perda de área cultivada e dificuldade do tráfego de máquinas quando da abertura de valetas. Além disso, nas valetas há necessidade de limpeza e manutenção, cujos gastos podem encarecer o projeto no final.

A drenagem subterrânea visa o controle do nível freático propiciando uma melhor aeração no sistema radicular. Para tal, é necessário o conhecimento das características físico-hídricas do solo, as características hidrológicas da região e características dos cultivos, ou seja, coeficientes de sensibilidade ao excesso e à falta de água.

6.2.3.1 Projetos de drenagem subterrânea

A maioria das áreas agrícolas com problemas de drenagem exigem técnicas de controle da água que estejam na superfície do solo (drenagem superficial) e/ou subsuperficialmente, no caso, controle do nível freático (drenagem subterrânea). Para o dimensionamento dos sistemas de drenagem agrícola é fundamental o conhecimento das recargas que esses sistemas estão sujeitos e que serão capazes de controlar, levando-se em conta as propriedades físico-hídricas dos solos. Uma dessas recargas denominadas como "seepage vertical", são provenientes de encostas e são controladas por meio de drenos interceptores. Assim, cabe aos drenos de campo o controle da recarga proveniente das chuvas e excedentes da irrigação. Em termos de Brasil, as primeiras são mais relevantes e intensas e, portanto, são utilizadas como recarga de projeto.

As estruturas de controle de águas naturais não são dimensionadas para serem capazes de comportar a máxima vazão absoluta que possa vir a atingi-las. Primeiro, porque é impossível conhecer a magnitude desse evento e, segundo, porque possivelmente a obra ficaria antieconômica. Devem ser utilizadas vazões de dimensionamento que apresentem uma certa probabilidade de ocorrer, probabilidade que deve ser tanto menor quanto maior for a importância da estrutura.

Tendo em vista que o sistema de drenagem ainda não foi implantado, e conseqüentemente as vazões que escoam para os drenos não são conhecidas, essas devem ser estimadas por equações que transformam as chuvas intensas em vazões (subterrâneas e superficiais), já que os dados de chuva podem ser obtidos com relativa facilidade.

Entretanto, como o armazenamento e o movimento da água na superfície do solo é bastante diferente do armazenamento e do movimento da água abaixo do lençol freático (LF), para fins de equacionamento e para facilitar a obtenção da solução, é comum, inicialmente, encarar essas duas técnicas de drenagem separadamente. Posteriormente, obtidas as duas soluções, faz-se uma conciliação para a obtenção do resultado.

Pela Tabela 1, pode-se observar diferentes situações de aplicação dos respectivos tipos de projeto de drenagem.

Tabela 1. Exemplos de necessidade de drenagem superficial e subterrânea (DUARTE et al., 2015).

Situação	Drenagem	Exemplo
LF ausente	Superficial	Campos de futebol, viveiros de mudas, aterros de estufas, campos de golfe
LF presente, mas de difícil controle	Superficial	Gleissolo com $K_o < 0,1 \text{ m dia}^{-1}$
LF presente com possibilidade de controle	Superficial e Subterrânea	Maioria dos solos de baixadas
LF presente e solo com infiltração muito alta	Subterrânea	Areia quartzosa hidromórfica profunda
Controle da lâmina d'água e melhoria na trafegabilidade	Superficial	Arroz inundado

6.2.3.2 Aplicação de novas tecnologias em projetos de drenagem subterrânea

(i) Modelagem computacional aplicada em projetos de drenagem agrícola

Relacionando esses excessos de água com a movimentação do lençol freático (LF), várias técnicas foram desenvolvidas para avaliar a dinâmica da água no solo e procurar relacioná-la com aspectos climáticos, parâmetros físico-hídricos do solo e da cultura e parâmetros geométricos do sistema de drenagem. Estas técnicas são importantes para o dimensionamento racional e implantação de projetos eficientes de drenagem. O desenvolvimento de novos procedimentos de dimensionamento, principalmente os que fazem uso de modelos computacionais, cresceu muito na década de 80, principalmente nos países desenvolvidos onde a drenagem é uma prática agrícola importante como nos Estados Unidos e na Holanda.

Alguns desses modelos tornaram-se ferramentas importantes pois permitem quantificar os impactos das práticas agrícolas sobre a produtividade das culturas e o meio ambiente (SABBAGH *et al.*, 1993).

Dentre esses modelos, um dos que vem sendo mais utilizados é o modelo norte-americano DRAINMOD (SKAGGS, 1981) aplicado por técnicos dos Estados Unidos como um método realmente efetivo para dimensionamento dos sistemas de drenagem (SKAGGS, 1990).

Esse modelo exige como dado de entrada séries históricas de precipitação de vários anos organizadas na forma horária. Nesse sentido, em termos de Brasil, Duarte (1997) desenvolveu o modelo SIMDRENO que simula a posição do LF e a umidade do solo na zona radicular, a partir de séries históricas de dados diários de precipitação, evapotranspiração, parâmetros físico-hídricos do solo, cultura e geometria do sistema de drenagem. O modelo estima a fração da precipitação que escoa superficialmente empregando o método do Número da Curva, calcula a posição do LF por meio de equações que consideram a recarga intermitente do lençol e estima a umidade do solo na zona radicular como base em um balanço hídrico.

Porém, apesar da sua funcionabilidade, o SIMDRENO apresentou algumas limitações quando comparado com o DRAINMOD. Em ausência de *seepage* vertical e em dias que não ocorrem precipitações o SIMDRENO não contabiliza o efeito do fluxo ascendente devido a evapotranspiração sobre o rebaixamento do LF, nem permite simular este rebaixamento abaixo da linha dos drenos. O SIMDRENO calcula o escoamento superficial independentemente do efeito de variações na umidade do solo e, portanto, não considera a influência da drenagem subterrânea sobre este escoamento.

Ao realizar o dimensionamento econômico dos sistemas de drenagem, o SIMDRENO permite a entrada de apenas 10 valores de espaçamentos a serem submetidos a simulação. Assim, para o usuário atingir a faixa mais econômica, é necessário realizar outra divisão de faixas em precisões maiores até atingir a mais econômica.

Com relação aos aspectos operacionais, o SIMDRENO foi desenvolvido para o sistema operacional DOS, o que o tornou difícil de ser operado por usuários que não tenham recebido um treinamento prévio. Além disso este modelo operava com dados de série histórica que são inseridos no programa via teclado, exigindo que sejam criados grandes arquivos com dados de precipitação e evapotranspiração diária anteriormente à realização das simulações.

Diante disso, Miranda (1997) considerou relevante o desenvolvimento de um novo modelo que superasse as limitações do modelo SIMDRENO e que pudesse atingir uma apresentação a nível comercial. Dessa forma, buscou-se na ocasião os seguintes objetivos: a) desenvolver um modelo de simulação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea no qual o efeito do fluxo ascendente seja contabilizado eficientemente sobre o rebaixamento do lençol freático; b) implementar no modelo a ser desenvolvido, uma rotina em que a estimativa do escoamento superficial dependa da profundidade do LF no dia corrente, permitindo assim contabilizar o efeito da drenagem subterrânea sobre a drenagem superficial e c) tornar mais interativa a relação entre o software e o usuário, bem como dotar o programa de uma apresentação comercial.

Daí surgiu o modelo SISDRENA (SIStema de DRENagem) (MIRANDA, 1997) que se trata de um modelo de avaliação de desempenho de sistemas de drenagem similar ao modelo norte-americano DRAINMOD (SKAGGS, 1990). Ambos os modelos são unidimensionais e contabilizam os principais componentes que afetam o balanço de água em um volume de solo homogêneo e de superfície unitária, equidistante entre dois drenos paralelos e que se estende desde a camada de impedimento até a superfície do solo. Visando superar a carência de dados horários de chuva no Brasil, o SISDRENA utiliza séries de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial de vários anos.

Tabela 2. Parâmetros de Entrada e Saída do Modelo SISDRENA.

Dados de Entrada do Modelo SISDRENA	Dados de Saída do Modelo SISDRENA
Chuva diária (mm dia ⁻¹)	Escoamento superficial diário (mm dia ⁻¹)
Evapotranspiração diária (mm dia ⁻¹)	Infiltração diária (mm dia ⁻¹)
Condutividade hidráulica do solo saturado (m dia ⁻¹)	Posição diária do LF (m)
Profundidade da camada impermeável (m)	Fluxo diário de água no dreno (mm dia ⁻¹)
Espaçamento entre drenos (m)	Armazenamento de água na zona radicular (mm)
Profundidade dos drenos (m)	Evapotranspiração diária (mm dia ⁻¹)
Raio efetivo do dreno (m)	Parâmetros de avaliação do sistema de drenagem (produtividade do cultivo)
Fluxo ascendente por <i>seepage</i> (mm dia ⁻¹)	Análise Econômica dos Espaços entre Dreno
Parâmetros da curva de retenção de água no solo	
Datas de plantio e colheita do cultivo	
Varição do sistema radicular	
Coefficientes de sensibilidade ao excesso e à falta de água	
Nível inicial do LV	
Umidade inicial do solo	

O escoamento superficial é calculado por uma modificação do método Número da Curva, a movimentação do LF é estimada pela equação proposta por de Zeeuw e Hellinga (SMEDEMA; RYCROFT, 1983) e a umidade na zona radicular da cultura é calculada por intermédio de um balanço hídrico. O SISDRENA determina os índices SEW₃₀ (somatório das alturas diárias do LF acima de um plano localizado a 30 cm de profundidade) e o *deficit* de evapotranspiração, a partir dos quais se estimam os efeitos do excesso e da falta de umidade, respectivamente, sobre produtividades de milho e

cana-de-açúcar. Uma vez obtida a produtividade relativa esperada com determinada probabilidade de sucesso para a série de dados climáticos utilizados e para cada espaçamento entre drenos submetidos à simulação, pelo modelo SISDRENA também é possível obter o espaçamento mais viável, por intermédio de uma análise econômica.

Pela Tabela 2 podem ser conferidos os dados de entrada e dados de saída do modelo SISDRENA e pela Figura 4 podem ser conferidas as simulações do modelo SISDRENA (sem a calibração necessária em relação ao tipo de solo para a localidade de Urbana, IL, EUA) comparado aos dados observados em campo e às simulações do modelo DRAINMOD.

Pela Figura 3, pode-se conferir o efeito do espaçamento entre drenos, para três tipos distintos de solo, na produtividade da cana-de-açúcar. Observa-se que em solos com menor capacidade de condução de água, menores são os valores de espaçamentos entre drenos que devem ser aplicados, para que se tenha uma produtividade e assim obter retornos positivos no projeto de drenagem subterrânea.

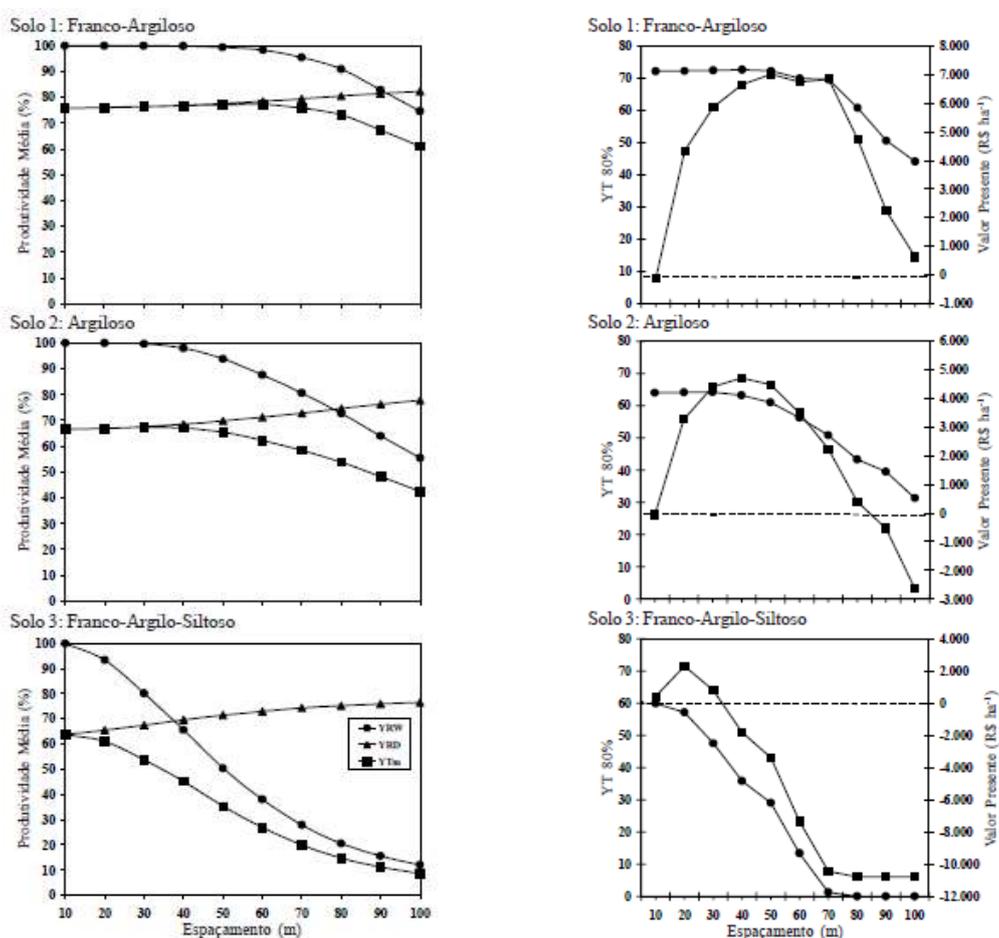


Figura 3. Simulações realizadas pelo modelo SISDRENA sobre a produtividade de cana-de-açúcar, evidenciando o efeito do espaçamento entre drenos na produtividade (DUARTE *et al.*, 2002).

Pela Figura 4, pode-se conferir algumas simulações realizadas pelo modelo DRAINMOD e SISDRENA, evidenciando um desempenho satisfatório do modelo SISDRENA em relação ao modelo DRAINMOD, mesmo sem a calibração do modelo SISDRENA em relação ao tipo de solo (para o qual foi aplicado), no qual os dados de campo foram coletados. Ou seja, caso fosse realizada uma "calibração" do modelo, o desempenho na simulação seria incrementado.

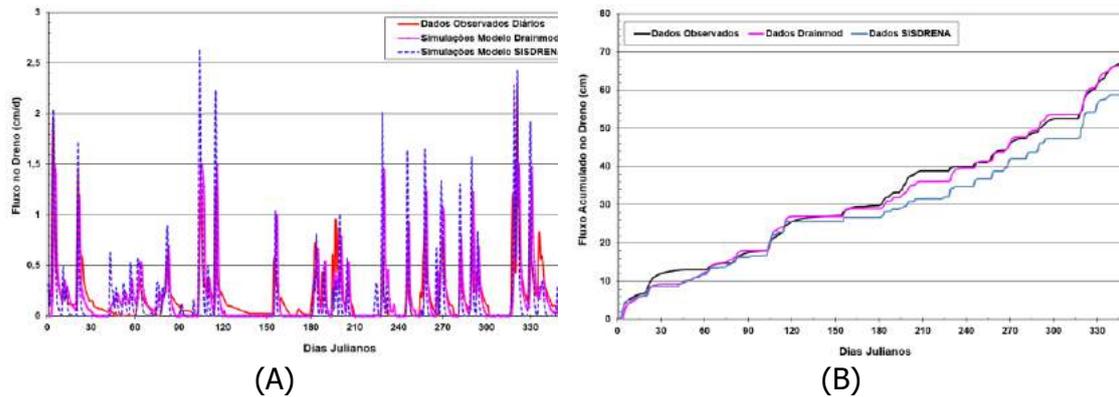


Figura 4. Simulações realizadas pelos modelos (A) DRAINMOD e (B) SISDRENA (sem a calibração para o solo em questão) para a localidade de Urbana (EUA) para o ano de 1993 (MIRANDA, 2011).

6.2.4 Aplicação de biorreatores em drenagem subterrânea

O Brasil é o 5º país do mundo com mais de 65 milhões de hectares de terras cultivadas. No entanto, essa área representa apenas 7,8% do território do país enquanto as áreas de preservação representam 66,3% da área total (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2020). De acordo com o programa Provarzeas, existem aproximadamente 30 milhões de ha de terras com solos mal drenados no Brasil, dos quais 768.000 ha são cultivados (LAMSTER, 1980).

Dessa forma, a busca por uma melhoria da drenagem do solo por meio da instalação de drenos subterrâneos é uma prática que apresenta um retorno positivo do investimento em áreas com solos mal drenados. No entanto, em termos de impacto ambiental, cabe ressaltar que as concentrações de nitrato-nitrogênio na drenagem subterrânea, por exemplo nos EUA, costumam ser da ordem de 10 a 20 mg $\text{NO}_3\text{-N/L}$ com perdas de nitrato-nitrogênio geralmente variando de 15-30 kg $[\text{N}] \text{ ha}^{-1}$ (CHRISTIANSON; HARMEL, 2015; HERTZBERGER *et al.*, 2019). Em relação ao caso brasileiro, existem alguns estudos relatando perdas quantitativas de nitrato-nitrogênio. Rosolém *et al.* (2018) mostrou que os sistemas de cultivo sem fornecimento de fertilizante N podem chegar a 33,6 kg $[\text{N}] \text{ ha}^{-1}$ por ano. Outros sistemas brasileiros podem chegar a 87 kg $[\text{N}] \text{ ha}^{-1}$ por ano de perdas de nitrato-nitrogênio (VILLALBA *et al.*, 2014). Embora nenhum sistema drenado seja utilizado, o nitrato ainda é uma fonte de comprometimento dos corpos d'água devido às características do solo que permitem o movimento desse soluto.

Nos EUA, biorreatores denitrificantes (também conhecidos como “*woodchip bioreactors*”) são uma opção atual de drenagem de conservação para mitigar o nitrato antes que a água de drenagem alcance o rio. Um biorreator, normalmente, consiste em uma trincheira cheia de lascas de madeira através do qual a água de drenagem é direcionada (CHRISTIANSON *et al.*, 2012; SCHIPPER *et al.*, 2010). Apresentam normalmente de 10 a 30 m de comprimento e de 2 a 8 m de largura e sua profundidade é determinada pela profundidade dos drenos do sistema de drenagem. O carbono nas lascas de madeira “alimenta” o processo natural de denitrificação, onde o nitrato da água é convertido em gás nitrogênio.

A denitrificação é um processo biológico realizado por bactérias denitrificantes, daí o nome de biorreator. Pelas Figuras 5A e 5B pode-se conferir a instalação do biorreator em condições de campo.

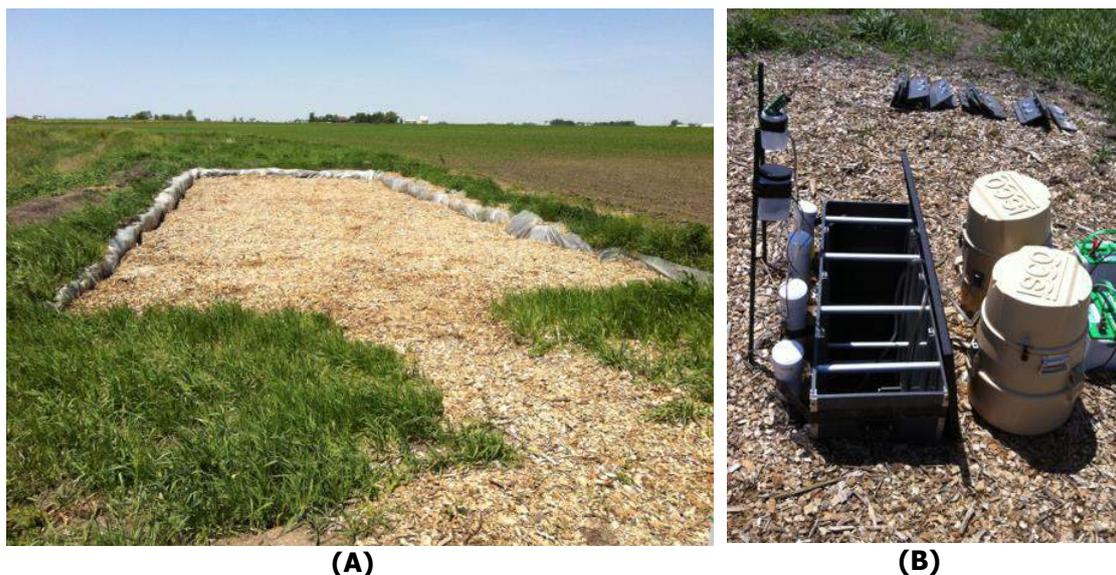


Figura 5. Instalação do biorreator em condições de campo (Illinois, EUA).

O projeto e a construção de biorreatores denitrificantes para o tratamento de nitrato em água de drenagem nos EUA são orientados pelo *United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service (NRCS) (Conservation Practice Standard 605: Denitrifying bioreactor; USDA NRCS, 2020)*. A maioria dos biorreatores são projetados com base em princípios de fluxo através de meios porosos (por exemplo, Lei de Darcy, equação de Forchheimer) emparelhados com a consideração do tempo de retenção hidráulica do projeto (CHRISTIANSON *et al.*, 2011; COOKE; BELL, 2014; GHANE *et al.*, 2014).

Práticas de drenagem de conservação, como biorreatores denitrificantes, não devem reduzir a capacidade de drenagem em campo, portanto, o tubo de fluxo de desvio de um biorreator é um componente de *design* essencial para minimizar a restrição de drenagem em campo durante eventos de alto fluxo. Isso significa que uma parte do volume total do fluxo de drenagem anual proveniente do campo contorna o biorreator do campo. A maioria das situações de campo exigiria um biorreator de um tamanho impraticável para tratar todo o volume de drenagem anual, com esse biorreator superdimensionado para as baixas taxas de fluxo que ocorrem na maior parte do ano.

As “maravalhas de madeira” são os meios mais comuns a serem utilizadas, porém, outros materiais também já foram testados (GIBERT *et al.*, 2008; CAMERON; SCHIPPER, 2010; HEALY *et al.*, 2012). O uso de maravalhas como preenchimento de biorreator geralmente reduz a manutenção do sistema, já que as maravalhas de madeira duram aproximadamente de 7 a 12 anos antes de precisarem ser substituídas (CHRISTIANSON *et al.*, 2020).

6.2.5 Projetos de drenagem superficial

Os sistemas de drenagem superficial são utilizados quando os problemas de drenagem ocorrem principalmente sobre a superfície do solo. Para tal, faz-se necessário “preparar” a superfície do solo para que a água possa se mover em direção a uma declividade projetada, de forma lenta e gradual, fazendo com que a superfície não fique inundada e que se aumente a capacidade de infiltração do solo.

As águas naturais são originadas por dois fenômenos principais: o escoamento subterrâneo e o escoamento superficial. Principalmente nos pequenos cursos d'água, quando ocorrem os picos de enxurrada, a maior parte da vazão escoada é de origem superficial, podendo o escoamento subterrâneo ser muitas vezes desprezado. Dessa forma, quando o escoamento superficial é estimado por modelos chuva-vazão, várias estruturas de controle podem ser dimensionadas como terraços, canais escoadouros, bueiros, aduelas, vertedores de pequenas barragens, drenos coletores e principais de áreas drenadas, entre outras.

Assim, durante um período de chuvas intensas, uma maior parte da chuva pode ser armazenada no solo levando a uma redução do escoamento superficial. Outro aspecto relevante para a drenagem superficial é a classificação da área-problema em uma área plana (declive médio menor que cerca de 1%) e área com declive (declividade média maior que cerca de 1%). No primeiro caso, o objetivo principal é eliminar a água estagnada na superfície, enquanto no segundo, o objetivo principal é o controle da erosão.

Pela Figura 6 pode-se conferir o efeito da drenagem do solo sobre seu arranjo poroso. Verifica-se que, quando é realizada drenagem superficial e subterrânea do solo, o solo passa a apresentar um maior volume de poros com ar (macroporos), revelando uma melhora na sua estruturação.

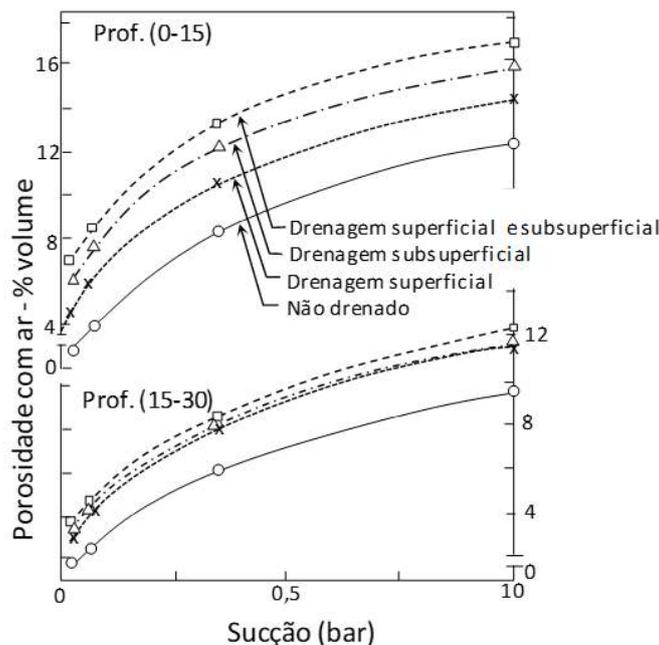


Figura 6. Porosidade livre de água, para duas amostras e diferentes tipos de manejo, em função da tensão à qual essas amostras são submetidas (DUARTE *et al.*, 2015).

Quando a área é plana, o objetivo da drenagem superficial é o de retirar, em tempo hábil, a água empoçada sobre a superfície do solo. Nesse caso as técnicas envolvem a sistematização ou o aplainamento da superfície do terreno, a abertura de sulcos e drenos rasos, a orientação das ruas de plantio e a subsolagem. Como o fenômeno da retenção e do escoamento da água sobre superfícies irregulares planas é de modelagem mais complexa do que o escoamento subterrâneo, a maioria desses sistemas ainda é projetado de forma empírica, tomando como base a experiência do projetista diante da observação do desempenho de sistemas já bem sucedidos e em operação. Entretanto, tal qual os sistemas de drenagem subterrânea, as estruturas que envolvem os sistemas de drenagem superficial de áreas planas englobam estruturas de

campo, rede principal (coletores e canal principal) e sistema de saída. Tendo em vista que, geralmente, também há necessidade de controle do LF da área do projeto, a rede principal e a saída, normalmente, são compartilhadas entre os drenos campo superficiais e os subterrâneos.

O projeto e o dimensionamento dos sistemas são baseados no conhecimento historicamente originado da drenagem superficial urbana, e que posteriormente foi aplicado ao meio rural. Estruturas de campo superficiais para áreas planas: (i) camalhões, (ii) drenos rasos com sistematização, (iii) valetas paralelas, (iv) drenos torpedos, (v) trincheiras drenantes, e em (vi) áreas com declive, terraceamento (terraços em nível e em desnível). Pela Figura 7, pode-se conferir aberturas de valetas para o cultivo de bananeiras, em Costa Rica, bem como, conforme citado anteriormente, a necessidade de serviços de limpeza e manutenção.

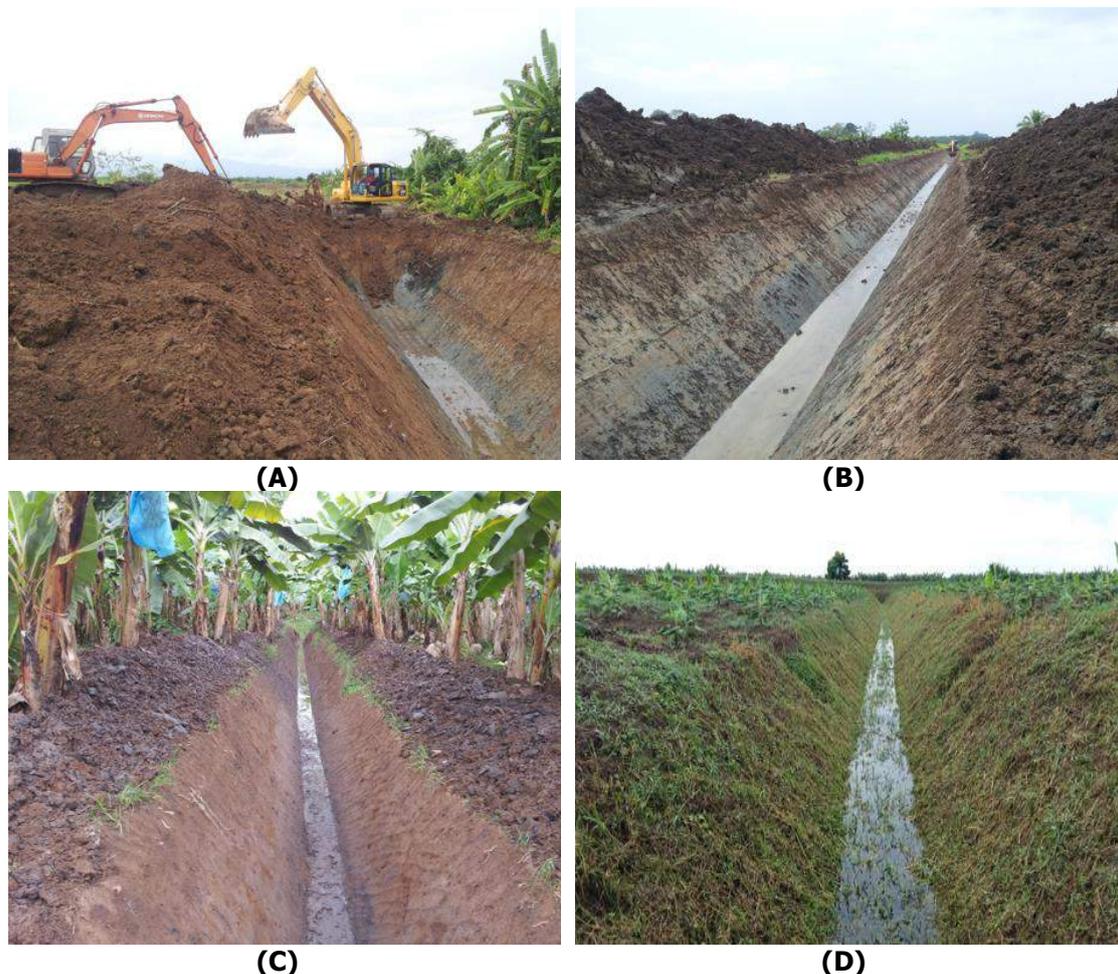


Figura 7. Abertura de valetas na Costa Rica (A) e (B) com posterior plantio de bananeiras (C) e a necessidade de serviços de manutenção (D) (Gentileza do Prof. Adrián Enrique Chavarría Vidal, Professor do Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola).

No caso de áreas com declive, o objetivo do sistema de drenagem superficial é o controle da erosão, e a conservação do solo e da água na microbacia. As estruturas, nesse caso, envolvem obras de infiltração e contenção da enxurrada ou de escoamento da enxurrada (terraços em desnível e canais escoadouros, por exemplo).

A Codevasf (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba) é uma empresa pública destinada a promover o desenvolvimento do

progresso das regiões ribeirinhas dos rios São Francisco e Parnaíba. A região possui uma área total de 620 mil Km², abrangendo estados que Minas Gerais a Alagoas (MG, BA, SE, AL, GO e Distrito Federal), sendo que a maior parte se concentra entre os estados de Minas Gerais e Bahia, compreendendo 505 municípios brasileiros, dentre eles 54% está inserido no chamado "Polígono da Seca".

O vale do São Francisco é dividido em 4 regiões, quais sejam.: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco (Figura 8).



Figura 8. Comitês de bacias implantados no São Francisco e suas novas divisões fisiográficas apresentadas na atualização do PBHSF (Plano de Recursos Hídricos 2016/2025 CBHSF, 2016).

Somente na cidade de Petrolina foram realizados projetos de drenagem com coletores abertos e subterrânea para 1140 km e 4000 ha respectivamente.

Os objetivos da implantação de projetos de drenagem são permitir a incorporação de áreas mal drenadas ao processo produtivo, evitar ocorrência de inundações, encharcamentos e salinização do solo. E criar condições para o desenvolvimento de uma agricultura produtiva.

Pela Tabela 3, pode-se conferir o custo atual para a implementação de ambos os projetos (drenos abertos e subterrâneos).

Tabela 3. Orçamento da implantação de sistemas de irrigação (Relatório de Gestão do Exercício 2018 da Codevasf).

Tipo	Custo (R\$)
Macro (Coletora aberta)	
Escavação	
Obras de arte	
Bueiros	
Junções	
Curva	
	R\$ 36.000,00 km ⁻¹
Micro (Subterrânea. E = 20 m)	
Aquisição e instalação de tubos corrugados	
	R\$ 10.200,00 ha ⁻¹

No entanto os valores apresentados anteriormente referem-se a obras de maior magnitude realizadas nas últimas décadas, como as de Nilo Coelho, Pontal e bebedouro. Anualmente a Codevasf atua com obras de drenagem em perímetros de irrigação distribuídos pela região do vale do São Francisco.

Em 2016 foi implementada a rede de drenagem superficial, bem como o levantamento topográfico e escavação de drenos coletores na região de Salitre em Juazeiro (BA), com o investimento total de 4.5 milhões de reais.

Em 2019 foram realizados estudos para a implantação de drenagem no rio Boacica em Igreja Nova (AL), com o investimento de 12 milhões de reais e geração de 7500 empregos, comprovando o potencial da agricultura irrigada na região e implementação de 150 km de canais, 146 km de drenos, 122 km de estradas, 46,6 km de diques e 3 estações de bombeamento.

Ainda em 2020 foi realizada a obra de esgotamento e drenagem pluvial em Floriano (PI), implantando cerca de 1,1 mil metros de galerias de drenagem, 680 metros de tubulação e o investimento de 61.7 milhões de reais visando a macrodrenagem da região do município de Floriano e o sistema de esgotamento sanitário através de 62 mil metros de redes coletoras de esgoto; 4,5 mil ramais prediais de esgotos; duas estações elevatórias de esgotos; 5,4 mil metros de emissários de recalques e uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE).

6.3 Considerações finais

A prática de drenagem de terras agrícolas, desde o início, apresenta a característica de propiciar o aproveitamento de novas áreas para a agricultura brasileira. Além do aumento da área agrícola, propiciar um aumento de produtividade nessas áreas. Atualmente, há uma grande discussão sobre a proteção de áreas naturais no território brasileiro. Dessa forma, a drenagem passa a assumir outros aspectos, não menos importantes, que são a proteção dessas áreas, bem como, evitar a contaminação de águas subterrâneas. Em termos futuros, na minha opinião pessoal, observo a necessidade de um aumento da aplicação de modelagem computacional, em estudos de drenagem agrícola, pois permite levar em consideração, de maneira rápida e eficaz, vários aspectos de solo, planta e atmosfera, sem a necessidade de implantação de projetos de drenagem em condições de campo, o que certamente seria inviável. Além disso, acredito no incremento de pesquisas na área de prevenção de contaminação ambiental, envolvendo principalmente estudos na área de dinâmica de solutos.

Referências

BRASIL. Lei 12.727, 17 de outubro de 2012. Altera a Lei 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p.1, 18 out. 2012.

CAMERON, S.G.; SCHIPPER, L.A. Nitrate removal and hydraulic performance of organic carbon for use in denitrification beds. **Ecological Engineering**, v.36, n.11, p.1588-1595. 2010.

CHRISTIANSON, L.; BHANDARI, A.; HELMERS, M. Potential design methodology for agricultural drainage denitrification bioreactors. In: EWRI CONGRESS PROCEEDINGS. Palm Springs, California. 2011.

- CHRISTIANSON, L.; HELMERS, M.; BHANDARI, A. A practice-oriented review of woodchip bioreactors for subsurface agricultural drainage. **Applied Engineering in Agriculture**, v.28, n.6, p.861-874. 2012.
- CHRISTIANSON, L.; HARMEL, R.D. 4R water quality impacts: An assessment and synthesis of forty years of drainage nitrogen losses. **Journal of Environmental Quality**, v.44, n.6, p.1852-1860, 2015.
- CHRISTIANSON, L.E.; FEYEREISEN, G.W.; HAY, C.H.; TSCHIRNER, U.W.; KULT, K.; WICKRAMARATHNE, N.; HOOVER, N.L.; SOUPIR, M.L. **Denitrifying bioreactor woodchip recharge**: Media properties after 9 years. Transactions of the ASABE, v.63, n.2, p.407-416, 2020.
- COOKE, R.; BELL, N. Protocol and interactive routine for the design of subsurface bioreactors. **Applied Engineering in Agriculture**, v.30, n.5, p.761-771, 2014.
- DUARTE, S.N. **Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos**, 143p., 1997. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- DUARTE, S.N.; MIRANDA, J.H.; FOLEGATTI, M.V. Dimensionamento econômico de sistemas de drenagem para a produção de cana-de-açúcar usando o modelo SISDRENA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande: UFPB, v.6, n.1, p.1-6, 2002.
- DUARTE, S.N.; SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; MEDEIROS, J.F.; LIMA FILHO, R.N.; GHEYI, H.R. **Fundamentos de drenagem agrícola**. 1. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica, v.1, 356p., 2015.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Territorial. **Sistema de Inteligência Territorial Estratégica da Macrologística Agropecuária brasileira (SITE-MLog)**. Campinas, 2020. Disponível em: www.embrapa.br/macrologistica. Acesso em: 03 dez. 2020.
- GHANE, E.; FAUSEY, N.R.; BROWN, L.C. Non-Darcy flow of water through woodchip media. **Journal of hydrology**, v.519, p.3400-3409, 2014.
- GIBERT, O.; POMIERNY, S.; ROWE, I.; KALIN, R.M. Selection of organic substrates as potential reactive materials for use in a denitrification permeable reactive barrier (PRB). **Bioresource Technology**, v.99, n.16, p.7587-7596. 2008.
- HEALY, M.G.; IBRAHIM, T.G.; LANIGAN, G.J.; SERRENHO, A.J.; FENTON, O. Nitrate removal rate, efficiency and pollution swapping potential of different organic carbon media in laboratory denitrification bioreactors. **Ecological Engineering**, v.40, p.198-209, 2012.
- HERTZBERGER, A.; PITTELKOW, C.M.; HARMEL, R.D.; CHRISTIANSON, L.E. The manage drain concentration database: A new tool compiling North American drainage nutrient concentrations. **Agricultural Water Management**, v.216, p.113-117. 2019.
- LAMSTER, E.C. Programa nacional de aproveitamento racional de várzeas – Provárzeas. **Informe Agropecuária**, Belo Horizonte, v.6, n.65, p.3-8, 1980.
- MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos**. 89p., 1997. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- MIRANDA, J.H.; COOKE, R.; DUARTE, S.N.; PINHO, R.E.C. Simulations of subsurface drainage systems with the SISDRENA model. In: 2011 ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2011, Louisville, Kentucky - EUA. **Asabe Technical Library**, p.1-17, 2011.
- PAVELIS, G.A. Economic survey of farm drainage. In Farm drainage in the United States: History, status and prospects, ed. G.A. Pavelis, p.110-136. **USDA Economic Research Service Miscellaneous Publication** 1455. Washington, DC: US Government Printing Office. 1987.

ROSOLEM, C.A.; ROSOLEM, G.; CASTOLDI, L.A.; PIVETTA, T.E. Ochsner Nitrate leaching in soybean rotations without nitrogen fertilizer. **Plant and Soil**, v.423, 2018, p.27-40, 2018, DOI 10.1007/s11104-017-3494-4.

SABBAGH, G.J.; FOUSS, J.L.; BENGSTON, R.L. Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.1, p.73-79, 1993.

SCHIPPER, L.A.; ROBERTSON, W.D.; GOLD, A.J.; JAYNES, D.B.; CAMERON, S.C. Denitrifying bioreactors--An approach for reducing nitrate loads to receiving waters. **Ecological Engineering**, v.36, p.1532-1543, 2010. DOI 10.1016/j.ecoleng.2010.04.008.

SHADY, A.M. **Irrigation, Drainage and Flood Control in Canada**. Ottawa, Canada: Canadian International Development Agency, 1989.

SKAGGS, R.W. **DRAINMOD** - Reference report: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Raleigh: USDA, SCS, 329p., 1981.

SKAGGS, R.W. **DRAINMOD**: user's manual. Raleigh: North Carolina State University, 101p., 1990.

SKAGGS, R.W.; VAN SCHILFGAARDE, J. Agricultural drainage. Agron. Monogr., v.38., **American Society of Agronomy**, Madison, WI, 1999.

SMEDEMA, S.K.; SMEDEMA, L.K.; VLOTMAN, W.F. **Modern Land Drainage**: Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems. London: Taylor and Francis Group, 2004.

SMEDEMA, L.K.; RYCROFT, D.W. **Land drainage**. Ithaca: Cornell University Press, 377p., 1983.

VILLALBA, H.A.G.; LEITE, J.M.; OTTO, R.; TRIVELLIN, P.C.O. Fertilizantes nitrogenados: novas tecnologias. **Informações Agronômicas**, n.148, p. 12-18, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304354615_Fertilizantes_nitrogenados_Novas_tecnologias. Acesso em: 26 mar. 2021.

CAPÍTULO 7

7 IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO

Sergio Nascimento Duarte

Resumo

Há cerca de 30 anos, acompanhando o advento da Plasticultura, aumentou o estabelecimento de propriedades nas quais se cultiva sob estufas e tuneis plásticos, principalmente nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. Trata-se de uma opção interessante para culturas muito intensivas como hortaliças, flores e mudas diversas. O sistema de irrigação mais adotado tem sido o localizado, também conhecido como microirrigação, devido à facilidade de controle da lâmina a aplicar, alta frequência e menor risco de erro de manejo propiciado pela baixa intensidade de aplicação de água. Acrescenta-se, ainda, a possibilidade de injeção de fertilizantes, CO₂, indutores de florescimento, entre outros produtos, junto com a água de irrigação. Entretanto, a experiência tem demonstrado que o cultivo em chão de estufa esbarra em cuidados adicionais devido aos riscos de salinização e compactação do solo, o que exige estratégias mais sofisticadas de condução. Devido a esse fato, vem crescendo a prática de cultivo em vasos e bags preenchidos com vários tipos de substratos. A essa prática soma-se a irrigação realizada sempre com solução nutritiva pré-preparada para se evitar enganos, o que tem sido chamado de nutrição ou hidroponia em substratos. Esse capítulo do Livro de Agricultura Irrigada aborda essa trajetória de desafios e soluções para a irrigação e a fertirrigação no crescente cultivo em ambiente protegido, que está se expandindo ultimamente para outras regiões do País.

7.1 Introdução

A atividade agrícola brasileira tem investido em tecnologia de produção em casas de vegetação, devido ao mercado consumidor extremamente exigente e ao alto valor econômico agregado às hortaliças e flores, principalmente (GUISELINI *et al.*, 2010). Olerícolas e plantas ornamentais podem ser cultivadas em diferentes épocas do ano em ambientes protegidos, o que permite aos produtores um melhor planejamento e uso dos recursos naturais, otimização da gestão e, principalmente, geração de preços competitivos de mercado (BOUERI; LUNARDI, 2006).

O cultivo em ambiente protegido oferece inúmeras vantagens, quando comparado ao tradicional realizado em campo, destacando-se, principalmente, a proteção das plantas contra chuvas torrenciais, vento, geadas (morangos, alface e flores, por exemplo, são sensíveis a chuva e vento intenso) e, ainda, redução do ataque de pragas e incidência de doenças. A estrutura desses ambientes e o material de cobertura proporcionam um microclima controlado, o qual pode ser manejado e adaptado às necessidades de cada cultura, e dessa forma, resultar em aumento do rendimento, qualidade e disponibilidade de produtos durante o ano (VOX *et al.*, 2010). Outros benefícios são o desenvolvimento mais acelerado dos cultivares e a possibilidade de se realizar a colheita precocemente (ROMANINI *et al.*, 2010). Em ambientes protegidos há um relevante aumento da produção e da qualidade do produto, proporcionando maior garantia de lucratividade ao produtor, uma vez que os efeitos das variações climáticas são minimizados (GOMES *et al.*, 2006).

Apesar da alta atratividade, o cultivo em ambientes protegidos exige cuidados em relação aos parâmetros micrometeorológicos, para que esses atendam às necessidades da cultura. A cobertura física dos ambientes protegidos implica em alterações de elementos micrometeorológicos no interior desses ambientes em relação ao ambiente externo, o que pode as vezes impactar negativamente o desenvolvimento da cultura. Segundo Guiselini *et al.* (2010), a radiação solar, que chega ao ambiente de cultivo, afeta diversos fatores, como a temperatura, a umidade relativa do ar e a temperatura do solo ou do substrato; além disso, ela age direta e indiretamente sobre todos os processos vitais das plantas, como a fotossíntese, a transpiração, o fotoperíodo, o crescimento do tecido vegetal e a floração.

7.2 O cultivo em estufas agrícolas

Uma das técnicas da agricultura moderna muito utilizada para viabilizar o cultivo fora de época, diminuir os custos e aumentar a produtividade, é o cultivo sob estufas plásticas que, juntamente com as novas tecnologias aplicadas à área de irrigação, como a fertirrigação, têm propiciado bons resultados (FACTOR *et al.*, 2008). O cultivo protegido exige, também, o conhecimento de outros aspectos, como a distribuição da radiação dentro da estufa, a evapotranspiração e o consumo hídrico das plantas, sempre na busca da maximização, em quantidade e em qualidade, da produção por unidade de área ou por unidade de volume de água aplicado, como é o caso de regiões onde a água é o fator limitante.

O desenvolvimento do cultivo em estufas tem crescido no mundo a uma taxa muito elevada. Os países mediterrâneos europeus e do Oriente Médio, que antes tinham pouca tradição com o uso dessa tecnologia, passaram a utilizá-la intensivamente. Essa tecnologia desponta como uma boa alternativa para os horticultores, haja vista que minimiza os efeitos da variabilidade ambiental, melhorando o desenvolvimento dos cultivos, permitindo a produção durante todo o ano e alcançando, assim, maiores preços no mercado (SILVA *et al.*, 1999a). Acrescentam-se, ainda, as vantagens de se proteger a cultura dos efeitos negativos do vento, da chuva e do granizo, possibilitar aumentos consideráveis de produtividade, melhor qualidade, economia de insumos e precocidade na colheita (GOMES *et al.*, 1999).

No Brasil também se tem observado um aumento significativo do uso de estufas agrícolas, sobretudo nas regiões Sudeste e Sul, acarretando aumento de simpósios e congressos nos quais se discute esse tema, assim como eventos especializados da área de Olericultura e de Engenharia Agrícola. Entretanto, a pesquisa científica no Brasil sobre o cultivo em ambiente protegido ainda é incipiente. Assim, com a expansão da atividade, vários problemas surgidos têm sido relatados por agricultores e técnicos envolvidos com essa atividade agrícola. Devido à falta de conhecimento sobre a tecnologia apropriada para esse tipo de cultivo, têm sido frequentes os problemas de salinização do solo, prejudicando o cultivo de hortaliças e flores nessas condições. Esses problemas provavelmente estão associados ao manejo inadequado da irrigação e da fertilização.

7.3 Irrigação em estufas

7.3.1 O método da irrigação localizada ou microirrigação

A irrigação é uma alternativa artificial para suprir a demanda de água de culturas. Em geral, o excesso ou a falta de água acarretam em baixa eficiência do uso de recursos hídricos em sistemas irrigados e são limitantes para a produtividade e para a qualidade dos produtos (PIRES *et al.*, 2007). A irrigação excessiva ocorre devido, principalmente,

ao planejamento incorreto, o qual muitas vezes é baseado apenas na experiência do produtor ao invés de cálculos e medições corretas da demanda de água pela cultura (THOMPSON *et al.*, 2007; PARDOSSI; INCROCCI, 2011; CARMASSI *et al.*, 2013).

O conhecimento da relação água-solo-planta-atmosfera permite inferir sobre a quantidade de água a ser aplicada e o melhor momento para a aplicação. A princípio, o correto manejo da irrigação, o qual proporciona a obtenção da produtividade economicamente viável, é aquele em que se aplica água no solo, no momento oportuno e em quantidades suficientes para suprir as necessidades hídricas da cultura, sem falta ou desperdício (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Atualmente, na Agricultura, os sistemas de irrigação são utilizados para garantir a qualidade e o padrão comercial dos produtos agrícolas. Estima-se que a área irrigada no mundo ocupe aproximadamente 17% de toda a terra agricultável e responda pela produção de mais de 40% de todo o alimento consumido (PAULINO *et al.*, 2011). Algumas técnicas de manejo da cultura podem ser associadas à irrigação e, dentre elas, a fertirrigação bem manejada se destaca como importante contribuição para o aumento da produtividade de culturas em muitas áreas irrigadas.

O método de irrigação localizada é o mais indicado quando se utiliza o cultivo em estufas, principalmente o gotejamento, pois esse sistema aplica água e nutrientes em quantidade e posição adequadas, proporcionando maior eficiência de aplicação e distribuição (MEDEIROS, 2010). Por ser um sistema de irrigação de alta frequência e baixa vazão, permite que a aplicação de fertilizantes via água de irrigação seja vantajosa, pois possibilita o incremento em quantidades precisas de nutrientes que a cultura demanda, em cada fase do seu ciclo vegetativo. Além disso, proporciona economia de água e energia, evita o molhamento excessivo das folhas, reduz a mão de obra para operação do sistema, aumenta o rendimento e a qualidade dos produtos (BILIBIO *et al.*, 2010; VILAS BOAS *et al.*, 2011).

7.3.2 Os sistemas de irrigação para estufas agrícolas

As plantas cultivadas sob estufas, obviamente privadas da chuva, são totalmente dependentes do sistema de irrigação para suprir suas necessidades hídricas. O conhecimento das condições climáticas e das condições ideais para cada espécie cultivada, o tamanho da estufa que se pretende implantar e a conveniência do agricultor facilitam na escolha do sistema que venha a trazer o melhor desempenho, podendo-se optar por um sistema mais simples ou mais automatizado. A seguir são abordados de forma resumida os principais tipos de sistema utilizados em ambientes protegidos.

Sistema de irrigação por gotejamento: é talvez aquele que possui um maior número de vantagens. São ótimos para a economia de água porque o fluxo ocorre junto ao solo podendo ser bem cronometrado e regulado. Levam água diretamente a cada planta ou recipiente, impedindo o crescimento de plantas daninhas, e são fáceis de montar. Além disso, todo o sistema pode ser ligado a sensores e temporizadores para automação. Os gotejadores podem possuir diferentes formatos, quais sejam, cilíndricos (bob), planos (chapinha), botão e labirinto contínuo. Podem ser não compensados ou autocompensados, sendo que esses últimos podem ter dispositivos anti sifão ou anti drenante. Devido à baixa pressão de serviço, geralmente, para estufas pequenas, de cerca de 200 m², um motor elétrico de 1,0 cv é suficiente para acionar a bomba. As bombas podem ser do tipo centrífuga ou periférica. Geralmente para a faixa de vazão versus pressão necessária, não é muito fácil achar bombas com rendimento acima de 60%. Possuem como desvantagem a susceptibilidade ao entupimento dos emissores, o que depende da qualidade da água de irrigação (JESUS *et al.*, 2017).

Sistema de irrigação por microaspersão: não tem de forma severa o problema de entupimento que têm os gotejadores. Pode ser instalado sobre o solo ou em tubulações aéreas, o que facilita o trânsito na estufa, principalmente quando dotado de válvula antigotas. Pode aspergir a quantidade de água desejada com precisão; sua uniformidade de distribuição, tal como os gotejadores, costuma ser maior que 90%. Os emissores, de vazão de 20 L h⁻¹ até de mais de 100 L h⁻¹, podem ser autocompensados ou não autocompensados, com difusor fixo ou giratório; o acionamento dos registros do sistema pode ser manual ou automatizado. Permite lançar defensivos e fertilizantes sobre a parte aérea das folhas com rapidez (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Sistema de nebulização: também conhecido como sistema de Misting (ou Fogger), é um sistema bem adaptado à irrigação de mudas e orquidários. Possuem tubos com *sprays* de bico fino que são colocados acima das fileiras de bandejas de mudas ou outras plantas. Os emissores trabalham com pressão de 30 a 40 m, fornecendo uma intensidade de aplicação de cerca de 3 mm h⁻¹. Esse sistema libera pequenas gotas de água (de cerca de 50 micras de diâmetro) em horários específicos, mantendo a planta úmida; ajuda a controlar a umidade e a temperatura uma vez que a névoa fina tende a evaporar, havendo uma troca de energia entre o ar quente e as gotículas frias ultrafinas lançadas no ambiente. A diminuição da temperatura no interior da estufa pode chegar de 4 a 6 graus Celsius. Os sistemas de nebulização se adaptam bem a flores tropicais e epífitas; é possível também a aplicação de defensivos agrícolas. Possuem como desvantagem, além do entupimento do bico (deve-se ter cuidado com a qualidade da água), a ineficiência em altas temperaturas e baixos valores de umidade relativa do ar (VOX *et al.*, 2010).

Sistema com barra de irrigação: consiste de uma barra móvel de alumínio com emissores, instalada em trilhos de aço galvanizado suspensos, que propicia um grande espaço livre na casa de vegetação. São oferecidas desde a forma mais simples (de empurrar) até completamente automatizada, quando não exigem a presença do operador dentro do ambiente protegido. Percorre a estufa em direção linear, longitudinalmente, com velocidades que podem ser reguladas. Permite aplicar pequenas lâminas por passada com alta uniformidade; se constituem em uma boa opção para mudas. Alguns modelos têm a altura do braço ajustável e conseguem realizar 3 operações, quais sejam, irrigação, fertirrigação e nebulização (COSTA *et al.*, 2019).

Sistema de irrigação por manta: é um sistema de rega relativamente inovador quando comparado aos sistemas convencionais. É um bom sistema se as plantas da estufa consistirem principalmente de vasos ou bandejas de propagação; isso porque a água é simplesmente absorvida por capilaridade, evitando-se mexer nas pequenas mudas. Nesse sistema, uma manta espessa é instalada sobre uma bancada com uma extremidade colocada em uma calha cheia de água. A ascensão capilar manterá a manta molhada, e os vasos com perfurações por baixo receberão água da mesma forma. Algumas mantas podem, também, vir com gotejadores integrados; esses são geralmente autocompensantes para uma faixa de 10 a 35 metros de pressão. Uma desvantagem desse tipo de irrigação é a eventual ocorrência de algas que podem entupir o sistema. Também não é um sistema adequado para se realizar fertirrigação (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Sistema de irrigação por mangueira manual: é um dos métodos mais antigos, simples e baratos que ainda podem ser vistos em algumas estufas com mudas. Consiste na utilização de uma mangueira plástica para se regar manualmente as plantas. Possuem a desvantagem de demandar elevada mão de obra para cobrir toda a área, acarretar dificuldade de controle da lâmina aplicada e muitas vezes molhar mais as folhas do que as raízes, o que pode ter implicações fitopatológicas. Como a mangueira

irriga com uma alta intensidade de aplicação, pode haver ainda problemas em substratos que apresentam um certo grau de hidrofobia, nos quais é comum a água percolar abaixo, para fora do vaso, antes que todo o substrato esteja umedecido. É um método usado mais comumente em pequenas estufas.

7.3.3 O cultivo em chão de estufa e o problema da salinidade

7.3.4 As causas da salinização em estufas

O conceito sobre tais problemas de salinização, comumente referentes a regiões semiáridas, pode facilmente ser transportado para sistemas de cultivo em ambiente protegido, visto que tais sistemas sempre dispõem da técnica da irrigação para reposição das necessidades hídricas das culturas, estando também protegidos das precipitações concentradas dos períodos chuvosos, o que inibe a lavagem natural dos sais acumulados no solo.

Embora as águas de irrigação utilizadas sejam geralmente de boa qualidade, altas doses de fertilizantes aplicados via água de irrigação, e muitas vezes de esterco animal, têm elevado os níveis de salinidade. Esse problema ocorre especialmente quando se utilizam recomendações de adubação quantificadas para campo aberto, em ambientes protegidos artificialmente e modificados em todos os sentidos; o manejo da irrigação e da fertirrigação também deve ser diferente, por ser a única fonte hídrica disponível para as culturas.

Torna-se necessário, portanto, estudos e posterior utilização de técnicas básicas para solucionar ou pelo menos reduzir os impactos causados pela utilização de procedimentos impróprios para estufas agrícolas, que são geralmente praticados ou por falta de informação do agricultor ou até mesmo pela ilusão de que haverá economia de recurso financeiro, deixando totalmente de lado a preservação do próprio empreendimento e a sustentabilidade dos recursos naturais.

Existem duas causas principais que proporcionam o acúmulo de sais no solo com maior frequência no cultivo comercial em estufas agrícolas. A primeira deve-se à utilização de águas de qualidade inferior (salobras), geralmente proveniente de poços. Embora não seja comum no Estado de São Paulo, na região de Piracicaba, Ipeúna e Rio Claro (SP), por exemplo, se localiza de forma aflorante o aquífero Passa Dois onde, segundo Oliveira e Salati (1981), é frequente a ocorrência, nos poços tubulares profundos, de águas ricas em cloretos e sulfatos de sódio, com teores responsáveis por valores de condutividade elétrica (CE) às vezes superior a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ e razão de adsorção de sódio também elevada.

Caso a salinização seja consequência da utilização de águas de qualidade inferior, a técnica utilizada de controle é a mesma utilizada em campo aberto: consiste em permitir que lâminas excedentes de irrigação percolem no perfil do solo e garantam um equilíbrio favorável de sais na zona radicular da cultura. Essa lâmina de lixiviação pode ser aplicada intencionalmente ou pode ocorrer naturalmente como consequência das perdas por percolação espontâneas proporcionadas pela técnica de irrigação.

A quantificação da lâmina total a ser aplicada pode ser realizada com base na evapotranspiração da cultura, na condutividade elétrica da água de irrigação e na tolerância da cultura à salinidade. A razão entre a lâmina de lixiviação e a lâmina total de irrigação é denominada na literatura como fração de lixiviação.

Entretanto, para que essa prática de controle seja eficiente, é necessário que a drenagem natural do solo seja adequada (SILVA *et al.*, 1999) ou que se disponibilizem

instalações artificiais para a drenagem, principalmente em se tratando de ambientes protegidos que são fechados e onde existe o risco de os solos cortados e sistematizados para a construção da estufa serem altamente compactados.

A irrigação praticada em ambientes protegidos, entretanto, faz uso principalmente de águas superficiais captadas em rios e em córregos, águas essas que na maior parte do País possuem baixos teores de sais. Assim sendo, pode-se considerar que o excesso e o inadequado manejo da adubação sejam a principal causa do problema, em virtude da adição de sais fertilizantes de elevado índice salino e em quantidades superiores àquelas requeridas para a nutrição das plantas, além da adição dos adubos orgânicos.

O excesso de aplicação de fertilizantes pelos agricultores em ambiente protegido ocorre, principalmente, porque são utilizadas as mesmas recomendações de adubação preconizadas para campo aberto, devido à ausência de investigações específicas, considerando a extração de nutrientes pelas plantas cultivadas em ambiente protegido. Mas, nas estufas agrícolas, as condições ambientais e as práticas agrícolas são bastantes diferenciadas, destacando-se a ausência de chuvas que poderiam promover lavagem de nutrientes por lixiviação ou escoamento superficial. Recomendações existentes de adubação para o cultivo em campo aberto devem servir apenas como referenciais, havendo, portanto, a necessidade de obtenção de informações específicas para estufas (GOMES *et al.*, 1999).

Em condições protegidas as plantas de pimentão, por exemplo, têm maior crescimento vegetativo em relação às de campo aberto, principalmente em virtude da aplicação de quantidades elevadas de nitrogênio (SILVA *et al.*, 1999). Além disso, as condições de cultivo em ambientes protegidos são diferentes daquelas observadas em campo a céu aberto, sobretudo com relação à menor evapotranspiração e à ausência de perdas de nutrientes por erosão e lixiviação profunda.

Tabela 1. Índice salino dos principais fertilizantes solúveis utilizados na fertirrigação em ambiente protegido (SILVA, 2002).

Fertilizantes	Solubilidade (g L ⁻¹ a 20°C)	Índice Salino (1,0 g ⁻¹ a 25°C)
Nitrato de Cálcio (Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O)	1200,00	82,25
Nitrato de Potássio (KNO ₃)	327,58	99,47
Nitrato de Amônia (NH ₄ NO ₃)	2075,00	32,80
Fosfato monoamônico (NH ₄ H ₂ PO ₄)	361,29	68,06
Fosfato monopotássico (KH ₂ PO ₄)	238,53	55,60
Sulfato de Potássio (K ₂ SO ₄)	123,80	112,94
Sulfato de Magnésio (MgSO ₄ · 7H ₂ O)	500,00	91,45
Sulfato de Amônio ((NH ₄) ₂ SO ₄)	830,00	34,50
Ureia (CO(NH ₂) ₂)	1170,00	75,00

O acúmulo de sais no solo em cultivos protegidos é bastante comum em virtude, principalmente, das altas doses de fertilizantes aplicadas e da falta de lixiviação dos sais acumulados após sucessivos ciclos de cultivo. Acrescenta-se a esses fatores a

possibilidade de utilização de águas de poços de má qualidade (salobras) (BLANCO, 2004), o que tem motivado a condução de diversos estudos nos últimos anos, visando avaliar métodos de controle da salinidade nessas condições de cultivo.

Uma alternativa apontada para minimizar o incremento da salinidade em ambientes protegidos é a utilização de fertilizantes com menor poder de salinização, como as alternativas que constam da Tabela 1, na qual estão apresentados diversos fertilizantes e comparados seus índices salinos.

Existem, assim, opções de fertilizantes que podem ser selecionados para o fornecimento de uma determinada quantidade de nutrientes a ser aplicada ao solo, com maior ou menor efeito sobre o incremento na condutividade elétrica da solução do solo.

Aplicando uma solução nutritiva com uma condutividade elétrica em torno de $4,0 \text{ dS m}^{-1}$, está-se aplicando aproximadamente uma solução com concentração de $2,56 \text{ kg m}^{-3}$ de sais. Se for levado em conta, por exemplo, o consumo hídrico de uma cultura em torno de 400 mm de lâmina por ciclo, instalada em um espaçamento de 0,5 m x 1,2 m, será colocado no solo 0,61 kg de sais por planta e, conseqüentemente, 10.240,00 kg de sais por hectare ao longo de um ciclo da cultura. Entretanto, considerando que esses sais fertilizantes são nutrientes e que parte desses ser absorvidos pela cultura e exportados da estufa, apenas o excesso será acumulado no solo. Todavia, ciclos de cultivos sucessivos vão proporcionar incremento no teor de sais no solo, se tal fato ocorrer frequentemente.

Na realidade, a principal causa do uso excessivo de fertilizantes por parte dos agricultores se deve geralmente à busca por elevadas produtividades, procurando garantir maiores lucros para o pagamento do investimento realizado com a estufa plástica, sem a preocupação com os possíveis impactos ambientais gerados e com a sustentabilidade da própria atividade agrícola a médio prazo.

7.3.5 Recuperação de solos salinizados em estufas agrícolas

Caso a salinidade do solo não seja controlada pelos métodos preventivos ou os diagnósticos revelem problemas de salinidade em estágios avançados, devem ser utilizados como solução métodos de recuperação do solo, tanto para o caso da salinização causada pelo uso de águas salobras quanto para o caso de salinização ocasionada pela aplicação de adubos em excesso. É importante salientar que o controle da salinização por meio de técnicas de prevenção é primordial e mais barato, e que as técnicas de recuperação do solo deverão ser utilizadas apenas quando realmente necessárias, tendo em vista o grande volume de água envolvido e o possível transtorno ambiental.

Considerando também que tal operação demanda uma certa quantidade de capital, principalmente em se tratando de estufas agrícolas cujas as estruturas são montadas em locais estratégicos em relação à radiação solar e à topografia, deve-se realizar uma avaliação econômica e pesar as alternativas para a escolha da melhor decisão (recuperar ou não o solo salinizado).

Quando o diagnóstico da salinização do solo realizado revela situações nas quais a concentração eletrolítica encontra-se elevada, e considerando positiva a viabilidade econômica e ambiental, torna-se recomendável a aplicação de lâminas de lavagem de recuperação do perfil. Esta técnica promove a eliminação dos sais solúveis por intermédio da aplicação de uma ou mais lâminas de água que lixiviam os sais para camadas de solo abaixo da zona radicular, o que é essencial para a recuperação dos solos afetados por sais; essa lâmina deve ser eliminada do perfil do solo por um sistema

eficiente de drenagem artificial, quando o solo for raso ou quando a drenagem natural do solo não for boa.

De acordo com Hoffman *et al.* (1992), a aplicação de uma pequena lâmina de recuperação no final de cada ciclo da cultura é viável para prevenir o excesso de sais na zona radicular, quando a salinidade da água de irrigação não é muito elevada.

É bastante difícil estimar com exatidão a lâmina necessária à lixiviação de recuperação devido à presença de fendas no solo, dissolução dos sais precipitados, restrições à difusão dos sais e à dispersão hidrodinâmica. Os modelos matemáticos desenvolvidos, como o americano Hydrus (SIMUNEK *et al.*, 2005), e o brasileiro MIDI (MIRANDA; DUARTE, 2002), por exemplo, ainda não conseguem representar adequadamente todas as grandes variações verticais e horizontais de solo que ocorrem em condições naturais de campo. Devido a isso, as estimativas baseadas em relações empíricas provenientes de experiências de campo de alguns autores ainda são as mais utilizadas.

Grosso modo, considera-se que de 70 a 80% dos sais solúveis poderão ser lavados por meio da aplicação de uma lâmina de água igual à profundidade de solo desejada, variando sua eficiência de acordo com a textura (SILVA; DUARTE, 2017; Silva *et al.*, 2019). Outra recomendação de cunho prático consiste em deixar a estufa descoberta, durante cerca de 2 meses de verão chuvoso (regiões SE e CE do Brasil, principalmente), no ano em que houver a troca do plástico de cobertura da estufa.

O primeiro requisito para a recuperação de qualquer solo afetado por sais é a existência de drenagem adequada no perfil. Tendo-se boa drenagem, a salinidade pode ser reduzida para um nível aceitável por meio da lixiviação; para solos sódicos, pode haver necessidade de aplicação e incorporação de corretivos químicos apropriados antes da adição da lixiviação, para permitir o deslocamento, lavagem e redução do teor de sódio (Na) trocável (AYERS; WESTCOT, 1991; RHOADES; LOVEDAY, 1990).

A quantidade de água necessária para realizar a lavagem de sais do perfil do solo é determinada em função das seguintes variáveis: nível inicial de salinidade do solo, nível final desejado, profundidade de solo a recuperar (que depende da cultura que será explorada), propriedades importantes do solo e da área, método de aplicação de água e nível de salinidade da água de recuperação (RHOADES; LOVEDAY, 1990).

Hoffman (1980), baseando-se em dados experimentais de campo, estabeleceu a seguinte relação para a estimativa da lâmina de lixiviação de recuperação (Equação 1):

$$\frac{CE_f}{CE_0} \cdot \frac{D_1}{D_s} = k \quad (1)$$

em que CE_f é a condutividade elétrica final do extrato de saturação desejada no perfil, ($dS\ m^{-1}$), CE_0 a condutividade elétrica média inicial do extrato de saturação do solo ($dS\ m^{-1}$); D_1 a lâmina de lixiviação a ser aplicada, m; e D_s a profundidade do perfil a ser recuperado (m).

O valor da constante k varia com o tipo de solo e com o método de aplicação de água. Segundo Hoffman (1980), os valores representativos de k para recuperação por inundação contínua são: 0,45 para solo orgânico; 0,3 para argiloso e 0,1 para solo franco arenoso. Geralmente o valor mais usado para inundação contínua é 0,3.

Miller *et al.* (1965) e mais recentemente Silva *et al.* (2019), comparando a irrigação por inundação contínua com a irrigação por inundação intermitente para recuperação de solos salinos, verificaram que houve uma redução para um terço da

água requerida quando se utilizou a inundação de forma intermitente. A lixiviação de sais ainda pode ser mais eficiente quando se utiliza irrigação por aspersão (NIELSEN *et al.*, 1966). Também Hoffman (1980) mostra que k praticamente não depende do tipo de solo quando a lavagem é feita por inundação intermitente ou por aspersão, podendo assumir o valor fixo de 0,1 para lavagem de recuperação, usando um desses métodos de irrigação, independentemente da textura do solo.

Estudando a recuperação de um solo salinizado por irrigação com água salobra em ambiente protegido, Blanco e Folegatti (2001) observaram que o aumento das lâminas de lavagem aplicadas realmente proporcionou redução da salinidade, sendo que as aplicações foram realizadas por inundação e por gotejamento. Os autores afirmam ainda que, para o método de irrigação por inundação, o perfil de salinidade do solo apresentou-se mais uniforme. Verificou-se também que o coeficiente k proposto por Hoffman (1980) subestimou a lâmina de lavagem ideal quando a aplicação foi feita por inundação e superestimou a lâmina para lavagem por gotejamento ($k = 0,1$).

Por outro lado, Duarte *et al.* (2007) concluíram, a respeito da recuperação de um solo salinizado devido ao excesso de fertilizantes em ambiente protegido, que a utilização da fórmula de Hoffman aplicada com a constante k de 0,1 subestimou a lâmina de lavagem ideal para a recuperação do solo por gotejamento, havendo na realidade a necessidade de se aplicar mais água para se atingir o valor planejado de CEF.

Essa controvérsia de resultados indica a necessidade de se realizar mais estudos sobre essa técnica, principalmente no que diz respeito aos tipos de solos, métodos de irrigação e íons envolvidos no processo de recuperação dos solos naturalmente existentes sob as estufas, quando salinizados devido à adubação excessiva.

7.3.6 O cultivo em substratos

Considerando a complexidade anteriormente apresentada sobre o cultivo sustentável dos solos originalmente existentes em chão de estufas, os substratos surgem como uma boa alternativa de condução. Os substratos consistem da combinação de dois ou mais componentes orgânicos, minerais ou mesmo sintéticos, que reunidos fornecem as propriedades químicas e físicas adequadas para o cultivo das plantas. A composição do substrato pode reunir matéria orgânica, areia, casca de pinus, fibra de coco, vermiculita, calcário, entre outros materiais que possuam boa retenção de água e ao mesmo tempo propiciem boa aeração por meio da facilidade de drenagem da lâmina eventualmente excedente.

Do ponto de vista da Horticultura, o substrato deve permitir que uma planta se desenvolva e produza com qualidade e em um breve período de tempo, com menores custos possíveis e considerando o nível tecnológico do produtor (BERJÓN *et al.*, 2005).

O produtor pode escolher dentre os substratos comerciais que apresentem boa aceitação no mercado e qualidade reconhecida, mas esta opção pode elevar os custos de produção. Portanto, pode optar por formular seu próprio substrato a partir de produtos disponíveis na propriedade ou na região de produção, com redução do custo final (ALMEIDA, 2017).

Nesse sentido, para a formulação dos substratos, objetiva-se que se reúna o máximo das qualidades de um substrato ideal que apresentaria as seguintes características: fácil manuseio e mobilidade, corpo e firmeza, boa capacidade de retenção de água, drenagem e aeração, estar livre de organismos nocivos com a presença dos úteis, não ser salino e nem possuir substâncias tóxicas, possibilitar a esterilização química e/ou física, ser uniforme e apresentar baixa taxa de encolhimento das partículas, não ser alcalino e nem ácido demais, e ser acessível e de baixo custo.

A maioria dos substratos minerais não se decompõem quimicamente ou biologicamente de maneira significativa durante os ciclos das culturas anuais. Portanto, na prática são considerados desprovidos de nutrientes.

Como os sistemas produtivos com uso de substrato, de maneira geral, são realizados utilizando-se recipientes ou vasos, o volume disponível é pequeno, o que limita o espaço a ser explorado pelas raízes, acarretando em uma maior densidade de raízes por volume de substrato, exigindo que esse apresente boa porosidade para promover melhores condições de respiração do sistema radicular.

Em relação à água disponível no substrato, vale ressaltar que, como há uma limitação do volume a ser explorado pelas raízes e a maior proporção de água armazenada se encontra em baixos potenciais, quando comparados com o solo, é recomendável realizar o manejo da fertirrigação com potenciais de água entre -1 e -10 kPa, dependendo da curva de retenção de água do substrato, o que quase sempre resulta em uma maior frequência de irrigação (SANJUÁN; GAVILÁN, 2004).

Apesar do volume do substrato ser restrito e inerte, na solução do substrato os nutrientes se encontram mais solúveis e são disponibilizados rapidamente, estando diretamente relacionados com as condições da solução nutritiva fornecida (ADAM, 2004).

Os sistemas produtivos que se caracterizam pelo uso de substrato em vasos ou slabs, com a aplicação de nutrientes em todas as irrigações (fertirrigação), são englobados nas denominações de cultivo sem solo (do inglês *soilless*) e chamados em Português de hidroponia aberta, sistema semi-hidroponico ou prática de nutrição (GAVILÁN, 2004), ou mesmo hidroponia em substrato.

7.4 Fertirrigação em estufas

Com o aumento da população mundial e a perspectiva de escassez dos recursos naturais, é necessário o desenvolvimento de uma agricultura mais intensiva e sustentável em seus diferentes aspectos, na qual os produtos químicos e os fertilizantes minerais sejam usados com o objetivo de aumentar a produção de alimentos com o mínimo de impactos ao ambiente.

Destaca-se entre as tecnologias que podem ser empregadas no cultivo de hortaliças, flores e mudas, o cultivo em ambiente protegido, associado à fertirrigação e ao uso de diferentes telados, que surgem como alternativas que podem permitir o aumento da produção da cultura de forma sustentável, reduzindo os riscos e combinando o suprimento nutricional via água de irrigação, bem como o controle da radiação fotossinteticamente ativa.

A fertirrigação consiste na aplicação de fertilizantes via água de irrigação. Essa técnica proporciona aumento da eficiência de absorção de nutrientes, parcelamento da adubação de acordo com sua absorção pela cultura, facilidade de incorporação do fertilizante ao solo e economia de mão de obra e de energia (OLIVEIRA *et al.*, 2016). A fertirrigação permite controlar o local e a profundidade da aplicação do adubo, o que pode contribuir para a economia de fertilizantes. Adicionalmente, essa técnica permite uma melhor uniformidade de distribuição de nutrientes, além de os tornar prontamente disponíveis na solução do solo, o que facilita a absorção pelas raízes das plantas (MARCUSI, 2005; ELOI, 2007).

Nos ambientes protegidos, em geral, são cultivadas culturas intensivas, as quais, se irrigadas com excesso de água, resultam em degradação ambiental e do cultivo, causados pela falta de aeração e lixiviação de fertilizantes (VOX *et al.*, 2010). São

necessários cuidados na adição de fertilizantes via irrigação, pois essa prática pode contribuir para o aumento dos níveis de salinidade do solo, muitas vezes ultrapassando os limites de tolerância das culturas, reduzindo o crescimento e o rendimento ao longo dos sucessivos cultivos (SILVA *et al.*, 2013). Portanto, o conhecimento das propriedades do solo, principalmente textura, estrutura, pH, capacidade de troca de cátions (CTC), densidade e condutividade elétrica (CE), e das propriedades da água de irrigação, como a concentração de sais e o pH, são de extrema relevância para o manejo adequado da fertirrigação e para o bom desenvolvimento das culturas.

7.4.1 Características da fertirrigação em estufas

A fertirrigação tem se destacado como uma das tecnologias de maior impacto na produção agrícola, possibilitando a distribuição de nutrientes durante o ciclo da cultura, de acordo com a necessidade nutricional das plantas, reduzindo os riscos de desperdício de fertilizantes e a contaminação ambiental (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Em ambiente protegido, a irrigação é imprescindível, mas o manejo inadequado do sistema de irrigação, da fertirrigação e da cultura podem inviabilizar o processo produtivo a médio prazo (PEREIRA, 2005).

Os sistemas de irrigação localizada são os mais indicados quando se utiliza a fertirrigação, principalmente o gotejamento, pois esses sistemas aplicam água e nutrientes na quantidade e posição adequadas, com maior eficiência de distribuição. A aplicação de fertilizantes via água de irrigação é vantajosa quando se usa sistemas de irrigação de alta frequência, pois possibilita a aplicação da quantidade correta de fertilizantes os quais o vegetal demanda para o seu ciclo vegetativo e produtivo (MEDEIROS, 2010). Além disso, tem sido uma prática comum para culturas que são desenvolvidas dentro de ambiente protegido, o que proporciona uma melhor utilização do sistema de irrigação, resultando em uma vantajosa relação custo/benefício para o agricultor (QUADROS *et al.*, 2010; PEDÓ *et al.*, 2013; SILVA; SILVEIRA, 2012).

A fertirrigação surge como a maneira mais eficiente e econômica de aplicar fertilizantes às plantas. Isto ocorre porque a aplicação desses fertilizantes, em menor quantidade por vez, mas com maior frequência, possibilita manter um nível uniforme de nutrientes no solo, aumentando a eficiência do uso pelas plantas e sua produtividade (BENINCASA *et al.*, 2011). Para se realizar o manejo da fertirrigação de forma eficiente é necessário um equilíbrio entre a quantidade de nutrientes e a quantidade de água a ser aplicada durante cada fase do ciclo da cultura, o que se reflete na concentração de fertilizantes adequada a ser utilizada na água de irrigação (BLANCO; FOLEGATTI, 2001).

Com o propósito de obter rendimentos elevados na cultura, estão sendo aplicadas doses excessivas de fertilizantes, o que pode resultar em um acúmulo de resíduos de fertilizantes e, por consequência, no aumento da salinidade do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Alguns fatores são de fundamental importância na produção de vegetais e para o bom desenvolvimento e crescimento da cultura. A nutrição das plantas é um dos fatores mais importantes e tem um impacto direto na produção e na qualidade dos vegetais. A fertirrigação é uma ferramenta que permite às plantas obter a quantidade de nutrientes exigida em cada fase fenológica, resultando em maior eficiência e economia na utilização de fertilizantes (FRIZZONE *et al.*, 2012). Desse modo, a fertirrigação deve ser gerenciada para manter uma concentração iônica adequada na solução do solo ou do substrato, nem excessiva, nem subestimada.

Depois do nitrogênio, o potássio é o elemento requerido em maiores quantidades pelas espécies de plantas cultivadas. Mais especificamente, está associado ao controle da abertura e fechamento dos estômatos, permite maior translocação de carboidratos

produzidos nas folhas para outros órgãos da planta, maior eficiência enzimática e melhoria da qualidade comercial da planta (SILVA, 2002). De acordo com esse autor, o potássio e o nitrogênio são os nutrientes mais acumulados pelos brotos em sistemas convencionais e protegidos de cultivo de plantas. A importância das funções que esses nutrientes desempenham nas plantas tem sido reconhecida, como na formação de componentes celulares (TAIZ; ZEIGER, 2013) e na regulação do potencial osmótico e da ativação enzimática (STREIT *et al.*, 2005).

Por meio das curvas de acúmulo de nutrientes é possível conhecer a demanda nutricional em cada etapa do crescimento, sendo importante, portanto, monitorar a necessidade por determinado nutriente ao longo do ciclo de uma cultura em cada fase fenológica. Pode-se, assim, reduzir o risco de aplicações de doses excessivas de fertilizantes, bem como reduzir o risco de se fornecer doses abaixo do mínimo exigido pela planta para atingir metas de produtividade (CAMERON *et al.*, 2013).

7.4.2 Controle da concentração da solução do solo

Dentre os métodos empregados para se monitorar a concentração de íons na solução do solo e controlar a salinidade desses em ambiente protegido, destaca-se a medição da condutividade elétrica da solução do solo, que se apresenta como um método bastante prático.

A medida da condutividade elétrica pode ser realizada em soluções de solo com diversos níveis de diluição; todavia, a quantificação da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) é a mais evidenciada na literatura e, portanto, tida como o método padrão (Richards, 1954). Entretanto, esse método se revela excessivamente trabalhoso para um controle rotineiro em nível de propriedade rural. Experiências bem sucedidas vêm sendo realizadas com métodos que propõem diferentes relações solo: água destilada como 1:1, 1:2,5 e, ainda, com o uso de extratores de cápsula porosa ou da Time-Domain Reflectometer (TDR).

A extração da solução do solo por intermédio de cápsulas porosas em umidades próximas à máxima capacidade de retenção ("capacidade de campo") é de fácil execução. Também deve-se levar em consideração que os poros da cápsula do extrator se assemelham muito aos poros do solo. O fluxo dos íons no solo para o interior da cápsula ocorre muitas vezes devido ao processo de difusão, que é o movimento de íons devido ao gradiente de atividade, e principalmente devido ao processo de transferência de massa, que é o movimento de íons arrastados pelo fluxo de água. Os extratores podem ser recomendados também para quantificar íons específicos solúveis na solução do solo, como o nitrato e o potássio, podendo ser utilizados para controlar e monitorar a quantidade desses elementos fertilizantes, evitando uma possível contaminação ambiental (BURGUEÑO, 1996; SILVA, 2002).

Outras vantagens do uso dos extratores são: a solução encontra-se em umidade equivalente ao momento em que a solução do solo é absorvida pela planta e os solutos dissolvidos serão os mesmos; a amostragem é sistemática, verdadeiramente pontual e não destrutiva; a aferição da condutividade é praticamente instantânea, podendo ser automatizada com equipamentos facilmente disponíveis e simples; e tais instrumentos de medida da CE podem ser utilizados sem calibração prévia, mesmo que, no solo, ocorra a presença de sais de baixa solubilidade, bastando, pois, que sejam conhecidas a umidade no momento da extração e a umidade da pasta saturada do solo.

A solução do solo pode ser extraída em diferentes níveis de umidade do solo, sendo esses quantificados por meio da instalação de tensiômetros, e fazendo o uso da curva característica de retenção de água no solo, com relativa precisão (Figura 1).

Conhecendo-se a umidade atual (no momento da aplicação do vácuo) e a umidade da pasta, corrige-se a leitura da CE obtida no extrator para a CE do extrato de saturação, por meio de um cálculo simples de diluição.

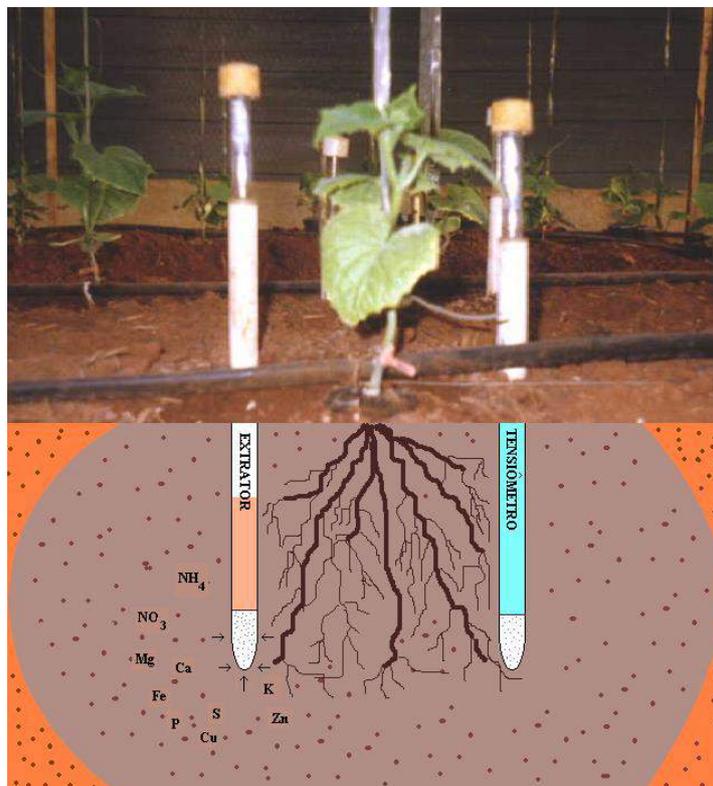


Figura 1. Extrator de cápsula porosa para sucção da solução do solo (à esquerda) e tensiômetro para correção da umidade (a direita) (SILVA, 2002).

Uma vez que o monitoramento periódico tenha sido estabelecido, a concentração de fertilizantes aplicados via água de irrigação, geralmente com frequência diária ou de poucos dias, pode ser controlada de forma a manter a concentração da solução do solo oscilando em uma faixa de CE adequada (BURGUEÑO, 1996), garantindo boa disponibilidade de nutrientes sem a ocorrência de problemas osmóticos.

Considerando que a aplicação de fertilizantes esteja monitorada, não há geralmente necessidade de aplicações intencionais de frações de lixiviação de manutenção, evitando possíveis desperdícios com água, energia e fertilizantes, além da contaminação do subsolo (SILVA, 2002; DIAS, 2004; ELOI, 2007; MEDEIROS, 2009).

A aplicação de fertilizantes deve ser diferenciada ao longo do ciclo da cultura, visto que a absorção de nutrientes específicos é função da fase fenológica da cultura (CHO *et al.*, 2018). Assim, é inevitável que com o passar do tempo ocorram certos desequilíbrios nutricionais, em virtude da dificuldade de se quantificar com precisão os nutrientes absorvidos pela planta e as interferências inerentes do efeito do complexo de troca catiônica da matriz sobre a solução do solo. Tendo em vista a ocorrência de situações nas quais se perde o controle sobre o estado nutricional do solo, pode-se lançar mão de testes rápidos para a medição da concentração de íons da solução do solo.

O conhecimento da concentração iônica da solução do solo é importante para se verificar a disponibilidade de nutrientes às plantas. Entretanto, a amostragem e a realização periódica de análise de solo, com a finalidade de acompanhar as concentrações de nitrato e de potássio na solução, durante as fases de crescimento e

de produção da cultura, frequentemente realizadas em pesquisas, são inviáveis técnica e economicamente em uma atividade agrícola comercial, além de não ser uma metodologia instantânea que possibilite tomar decisões imediatas. O extrator de solução surge, então, como uma alternativa capaz de solucionar o problema de forma eficaz e a baixo custo, principalmente se associado a determinações rápidas da concentração de íons no campo. Entretanto, são necessários mais estudos para validar os resultados obtidos por meio de extração via cápsulas porosas, assim como a utilização de testes rápidos (cartelas) para determinar íons específicos.

Silva (2002) conclui que, com o auxílio dos extratores providos de cápsulas porosas cerâmicas e testes rápidos, é possível determinar a concentração de nitrato e de potássio com boa precisão, e monitorar a concentração do íon cálcio na solução do solo com precisão média, quando comparado aos métodos padrões. Segundo Dias (2004), o monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo, extraída por cápsulas porosas, permite evitar possíveis processos de salinização e/ou deficiência nutricional em estufas agrícolas.

A metodologia mais usual para a quantificação dos fertilizantes a serem adicionados à água de irrigação baseia-se em recomendações realizadas após estudos sobre a necessidade nutricional das culturas e da sua marcha de absorção de nutrientes ao longo do ciclo. Entretanto, esses estudos são realizados em uma determinada região, sob os efeitos climáticos locais e para certas variedades e/ou híbridos específicos, gerando dúvidas quanto à extrapolação dos resultados.

Nesse aspecto, seria mais viável racionalizar o manejo da fertirrigação, por meio da determinação da condutividade elétrica e/ou da concentração parcial de íons da solução do solo. Caso a condutividade elétrica da solução do solo apresente valores inferiores ao máximo tolerado pela cultura, sem decréscimo de rendimento relativo, e superiores ao mínimo necessário para sua nutrição, a concentração da solução do solo estaria controlada (BURGUÑO, 1996; XU *et al.* 1995).

Silva (2002) comparou o efeito de dois tipos de manejos de fertirrigação sobre o rendimento da cultura do pimentão, quais sejam: (i) monitoramento da concentração da solução do solo e (ii) manejo tradicional de fertirrigação, via aplicação de doses específicas pré-estabelecidas, segundo a marcha de absorção da cultura, sendo ambos os manejos sob ambiente protegido. Concluiu que os valores de condutividade elétrica da solução do solo mostram maior estabilidade quando o manejo é baseado no monitoramento das concentrações. Esse mesmo autor afirma que os manejos de fertirrigação utilizados não acarretaram em diferenças no rendimento da cultura, possivelmente em consequência da utilização de recomendações acertadas, adotadas no manejo tradicional (ii). Entretanto, o manejo com monitoramento da solução (i) propiciou economia de fertilizantes, o que leva à conclusão de que o manejo baseado em doses fixas recomendadas pode, durante cultivos sucessivos, estar sujeito a um maior risco de causar aumento da salinidade e redução de rendimento, ao longo de vários ciclos na mesma estufa. Posteriormente a Silva (2002), outros autores (DIAS, 2005; ELOI, 2007; MEDEIROS, 2009; SILVA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2015) chegaram a conclusões semelhantes trabalhando com outras culturas em ambiente protegido.

7.4.3 Uso de soluções nutritivas no cultivo em substratos

Em sistemas produtivos sem o uso do solo, a disponibilização de nutrientes é realizada com a solubilização fertilizantes na água, na preparação da solução nutritiva a ser utilizada como irrigação. A escolha das fontes e quantidades a serem usadas na

formulação depende de vários fatores, como o clima e a proporção entre os nutrientes ideal para cada cultura (RESH, 2012; ZOTARELLI *et al.*, 2008).

A solução nutritiva deve conter os nutrientes essenciais às plantas. Na literatura, existem diversas formulações de soluções nutritivas com diferentes balanços entre os nutrientes (Tabela 2), que são recomendadas desde que observado o sistema produtivo adotado, a cultura, o clima, entre outros fatores (TEIXEIRA, 1996; RESH, 2012).

Tabela 2. Faixas de concentrações dos nutrientes das soluções nutritivas encontradas na literatura (TEIXEIRA, 1996).

Nutriente	Concentração (mg L ⁻¹)
Nitrogênio (N)	100 – 300
Fosforo (P)	35 – 75
Potássio (K)	200 – 400
Calcio (Ca)	100 – 200
Magnésio (Mg)	40 – 80
Enxofre (S)	50 – 80
Boro (B)	0,5 – 1,0
Cobre (Cu)	0,02 – 0,10
Ferro (Fe)	2,0 – 10,0
Manganês (Mn)	0,5 – 1,0
Molibdênio (Mo)	0,01 – 0,05
Zinco (Zn)	0,05 – 0,1

Independente da formulação da solução nutritiva adotada, deve-se atentar para o monitoramento do pH e da condutividade elétrica. O pH é uma variável que deve ser controlada na solução nutritiva; seus valores estão diretamente relacionados com a disponibilidade e a absorção dos nutrientes; por exemplo, em um pH alto os fosfatos se tornam menos solúveis (LI *et al.*, 2018). De maneira generalizada, o pH da solução nutritiva para a maioria das culturas deve ser mantido na faixa de 5,5 a 6,2, pois é nessa faixa em que o balanço entre as disponibilidades dos nutrientes é mais equilibrado, o que facilita suas respectivas absorções em níveis ideais (ADAM, 2004; COVA *et al.*; 2017).

A condutividade elétrica da solução nutritiva é uma variável diretamente proporcional à concentração de sais dissolvidos e ao potencial osmótico, sendo usada para avaliar o potencial de salinidade de uma solução nutritiva. A mensuração dessa variável é considerada fácil e barata, quando comparada com a determinação individual de cada nutriente. Uma condutividade elétrica baixa indica que há pouca disponibilidade de nutrientes. Quando a condutividade elétrica é mais alta do que o ideal, geralmente há redução da absorção de água e nutrientes pela planta devido aos efeitos da salinidade, afetando diretamente o crescimento das plantas e a produtividade (ADAM, 2004). Por outro lado, soluções nutritivas com CE menor que 2,0 dS m⁻¹ não costumam causar problemas osmóticos (ROOSTA *et al.*, 2009).

Para algumas culturas em sistema de cultivo sem uso do solo, existem soluções nutritivas bem ajustadas às suas especificidades, como por exemplo, para o tomate

(SCHWARZ; GROSCHE, 2003; RESH, 2012), para a alface (FURLANI, 1998; FURLANI *et al.*, 2009) e para o pepino (GISLEROD; ADAMS, 1983; ROOSTA *et al.*, 2009), entre outras culturas.

7.5 Considerações finais

O método de irrigação mais usado em ambientes protegidos tem sido o localizado. Uma tendência que se pode vislumbrar na irrigação utilizando esses sistemas atualmente é a automação, pois o agricultor almeja depender cada vez menos de mão de obra. Atualmente já é possível selecionar o melhor horário, período do dia e quantidade de água a ser aplicada, assim como programar o sistema para que ligue a nebulização quando detectada uma queda na umidade relativa do ar. Desse modo, são crescentes os estudos para automatizar cada vez melhor a irrigação, envolvendo, inclusive, complexos sensores aéreos e de solo, e até sistemas de inteligência artificial com aprendizado de máquina.

Já o manejo da fertirrigação em estufas agrícolas vem englobando uma faixa que vai desde: (i) os conceitos tradicionais de Fertilidade do Solo até (ii) as técnicas mais modernas de Hidroponia e condução em substratos. Quando se cultiva em solo argiloso, principalmente em chão de estufa e com frequência de irrigação não muito alta, valem as recomendações clássicas da ciência da Fertilidade, na qual a CTC do solo é o principal foco a ser observado. Por outro lado, quando se utiliza areia ou outros substratos, muitas vezes em vasos, com frequência de irrigação diária ou maior, o foco passa a ser a solução do solo. Muitas vezes irriga-se sempre com a própria solução nutritiva para se evitar enganos, o que vem sendo chamado de nutrição ou hidroponia em substrato.

No primeiro caso (cultivo sobre o solo natural existente sob a estufa), como a CTC do solo tende a ser mais alta e como o tempo de difusão dos cátions adsorvidos para a solução é maior e mais intenso, espera-se que se possa obter melhores resultados mantendo-se valores de CE mais baixos na solução do solo. No segundo caso (cultivo em substratos), dada a pequena CTC e a frequente reposição da solução que tende a não se concentrar entre as irrigações, valores de CE mais altos tendem a garantir uma melhor nutrição, mesmo sob uma certa depleção osmótica, principalmente nos meses de inverno.

A tendência que se observa nas localidades brasileiras com maior quantidade de estufas é a utilização cada vez maior de substratos, ou seja, pode ser necessário um trabalhoso monitoramento constante da solução do solo para se obter o delicado equilíbrio do segundo caso, relatado no parágrafo anterior, caso se irrigue com água pura. Na prática, como alternativa mais simples, tem-se realizado a nutrição, irrigando-se com a própria solução nutritiva. Muitas vezes é aplicada uma lâmina de solução nutritiva em excesso para lixiviação, propositalmente, como forma de controle da salinidade. Entretanto, essa alternativa pode pecar pelo problema de uma certa contaminação ambiental, dependendo da localização da estufa na propriedade.

Conclui-se, portanto, que em termos de manejo da fertirrigação sob estufas, está havendo a abertura de um amplo caminho, para uma promissora e complexa linha de estudos interdisciplinares, que englobam Química do Solo, Fertilidade do Solo, Nutrição Mineral de Plantas, Uso de Substratos, Fertirrigação e Salinidade.

Referências

- ADAM, P. Aspectos de la nutrición mineral em cultivos sin suelo em relación al suelo. In: GAVILÁN, M.U. (Ed.) **Tratado de cultivo sin suelo**, 3. Ed. rev. y ampl. Editora Mundi-Prensa: Madrid, Barcelo, México. 81-112p., 2004.
- ALMEIDA, J.M.D. **Avaliação de três variedades de lisianthus em ambiente protegido com telas de sombreamento de diferentes aspectos de cor**. 52p., 2017. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. Tradução de GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, FAO. **Estudos de Irrigação e Drenagem**, v.29, 218p., 1991.
- BENINCASA, P.; GUIDUCCI, M.; TEI, F. The Nitrogen use efficiency: Meaning and sources of variation - Case studies on three vegetable crops in central Italy. **HortTechnology**, v.21, p.266-273, 2011.
- BILIBIO, C.; CARVALHO, J.D.A.; MARTINS, M.; REZENDE, F.C.; FREITAS, E.A.; GOMES, L.A. Desenvolvimento vegetativo e produtivo da berinjela submetida a diferentes tensões de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.7, p.730-735, 2010.
- BLANCO, F.F. **Tolerância do tomateiro à salinidade sob fertirrigação e calibração de medidores de íons específicos para determinação de nutrientes na solução do solo e na planta**. 115p., 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.76-80, 2001.
- BOSCO, M.R.O.; OLIVEIRA, A.B.; HERNANDEZ, F.F.F.; LACERDA, C.F. Influência do estresse salino na composição mineral da berinjela. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.2, p.157-164, 2009.
- BOUERI, M.A.; LUNARDI, D.M.C. Avaliação de elementos agro meteorológicos no cultivo do cravo-de-defunto (*Tagetes sp.*) em ambiente protegido e a campo. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.21, n.3, p.45-54, 2006.
- BURGUEÑO, H. **La fertiirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico**. Culiacan, Sin. Mexico, v.1, 45p., 1996.
- CAMERON, K.C.; DI, H.J.; MOIR, J.L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. **Annals of Applied Biology**, v.162, n.2, p.145-173, 2013.
- CARMASSI, G.; BACCI, L.; BRONZINI, M.; INCROCCI, L.; MAGGINI, R.; BELLOCHI, G.; MASSA, D.; PARDOSSI, A. Modelling transpiration of greenhouse gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus) grown in substrate with saline water in a Mediterranean climate. **Scientia Horticulturae**, v.156, n.7, p.9-18, 2013.
- CHO, W.J.; KIM, H.J.; JUNG, D.H.; KIM, D.W.; AHN, T.I.; SON, J.E. On-site ion monitoring system for precision hydroponic nutrient management. **Computers and electronics in Agriculture**, v.146, n.3, p. 51-58, 2018.
- COSTA, V.M.; FOLEGATTI, M.V.; DUARTE, S.N.; DIAS, N.S.; SILVA, C.R. Construção e avaliação de uma barra de irrigação semiautomática para casa de vegetação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.13, p.3297-3305, 2019.
- COVA, A.M.W.; FREITAS, F.T.O.; VIANA, P.C.; RAFAEL, M.R.S.; AZEVEDO NETO, A.D.; SOARES, T.M. Content of inorganic solutes in lettuce grown with brackish water in different hydroponic systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.3, p.150-155, 2017.

- DIAS, N.S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido**, 110p., 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- DIAS, N. da S.; DUARTE, S.N.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F. de; SOARES, T.M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.496-504, 2005.
- DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; YOSHINAGA, R.T.; TELES FILHO, J.F. Produção de alface sob diferentes níveis de salinidade do solo. **Irriga**, v.10, n.1, p.20-29, 2005.
- DUARTE, S.N.; DIAS, N.S.; TELES FILHO, J.F. Recuperação de um solo salinizado devido a excesso de fertilizantes em ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v.12, n.3, p. 422-428, 2007.
- ELOI, W.M. **Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre o cultivo do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill) em ambiente protegido**. 110p., 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ELOI, W.M.; DUARTE, S.N.; SOARES, T.M. Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre características do tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, p.83-89, 2007.
- FACTOR, T.L.; ARAÚJO, J.A.C.; VILELLA JÚNIOR, V.E. Produção de pimentão em substratos e fertirrigação com efluente de biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.143-149, 2008.
- FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.; FARIAS, M.A. **Microirrigação. Gotejamento e Microaspersão**. Editora Eduem, 356p. 2012.
- FURLANI, P.R. Instruções para hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia NFT. Instituto Agrônomo. **Boletim técnico** 168, 30p., 1998.
- FURLANI, P.R.; SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas parte 2** - Solução nutritiva. Disponível em: Infobibos.com/artigos/2009_2/hidroponiap2/index.htm. Acesso em: 17 nov. 2020.
- GAVILÁN, P.; RUIZ, N.; LOZANO, D. Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in greenhouses in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. **Agricultural Water Management**, v.159, p.307-317, 2015.
- GOMES, A.R.M.; D’ÁVILA, J.N.T.; GORDIM, R.S.; BEZERRA, F.C.; BEZERRA, F.M.L. Estimativa da evapotranspiração e coeficiente de cultivo da *Heliconia psittacorum* L x H. *spathocircinada* (Arist) cultivada em ambiente protegido. **Revista Ciência Agronômica**, v.37, n.1, p.13-18, 2006.
- GOMES, L.A.A.; SILVA, E.C.; FAQUIN, V. Recomendações de adubação em ambientes protegidos. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª**. Aproximação. Viçosa, 360p., 1999.
- GUISELINI, C.; SENTELHAS, P.C.; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Manejo da cobertura de ambientes protegidos: Radiação solar e seus efeitos na produção da gérbera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.81, p.645-652, 2010.
- HOFFMAN, G.J. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. In: INTER-AMERICAN SALINITY WATER MANAGEMENT TECHNICAL CONFERENCE, Juarez. **Proceedings**. Juarez, p.49-64. 1980.
- HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. **Management farm irrigation systems**. ASAE Monograph, 9. St. Joseph: ASAE, 1040p., 1992.

JESUS, F.L.F.; NASCIMENTO, J.G.; COELHO, R.D.; DUARTE, S.N.; MENDONÇA, F.C. Water use in irrigated agriculture: An approach to water productivity in drip and sprinkler systems.

Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.11, n.5, p.1677-1684, 2017.

LI, Z.; WANG, P.; MENZIES, N.W.; KOPITTKE, P.M. Defining appropriate methods for studying toxicities of trace metals in nutrient solutions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.147, n.1, p.872-880, 2018.

MARCUSSI, F.F.N. Uso da fertirrigação e teores de macronutrientes em planta de pimentão.

Engenharia Agrícola, v.25, n.3, p.642-650, 2005.

MEDEIROS, P.R.F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do pepino enxertado**. 82p., 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MEDEIROS, P.R.F. de. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso**. 85p., 2010. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MEDEIROS, P.R.F.; DUARTE, S.N.; DIAS, C.T.S. Tolerância da cultura do pepino à salinidade em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.406-410, 2009.

MEDEIROS, P.R.F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso**. 85p., 2010. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MILLER, R.J.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Chloride displacement in Panoche clay loam in relation to water movement and distribution. **Journal of Water Resource Research**, v.1, p.63-73, 1965.

MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Modelo de simulação da dinâmica do nitrato em colunas verticais de solo não saturado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.235-241, 2002.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; LUTHIN, J.N. Desalination of soils under controlled unsaturated flow conditions. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL COMMISSION OF IRRIGATION AND DRAINAGE, 6. New Delhi. **Proceedings**. New Delhi: ICID, p.15-24, 1966.

OLIVEIRA, A.S.; SALATI, E. Um estudo sobre as águas subterrâneas da região de Piracicaba. **Anais**, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, v.38, p.163-190, 1981.

OLIVEIRA, F.A.; DUARTE, S.N.; MEDEIROS, J.F.; DIAS, N.S.; OLIVEIRA, M.K.; SILVA, C.P.; LIMA, K.S. Nutrição mineral do pimentão submetido a diferentes manejos de fertirrigação. **Horticultura Brasileira** (Impresso), v.33, p.216-223, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620150000200013>. Acesso em: 23 mar. 2021.

OLIVEIRA, J.M.; REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L.; MALLER, A.; HARA, A.T.; SANTOS, F.A.S. Fertirrigação na cultura da rúcula (*Eruca sativa* Miller) conduzida em ambiente protegido. **Irriga**, v.21, n.3, p.438-448, 2016.

PARDOSI, A.; INCROCCI, L. Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops. **HortTechnology**, v.21, p.309-313, 2011.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C.A.; ROMÁN, R.M.S.; JOSÉ, J.V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, v.16, n.2, p.163-176, 2011.

PEDÓ, T.; MARTINAZZO, E.G.; AUMOND, T.Z.; CAPELLARI, M.R.; DE SOUZA, V.L.; SOUZA, E.A.; VILLELA, F.A.; LOPES, N.F.; MAUCH, C.R. Adubação nitrogenada e sua relação à biometria e partição de assimilados em plantas de rabanete cultivar “Comprido de Ponta Branca”. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v.7, n.3, p.31-36, 2013.

- PEREIRA, J.R.; CARVALHO, J.D.A.; MIGUEL, D.S.; SANTANA, M.J.D. Consumo de água pela cultura do Crisântemo cultivada em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.3, p.651-659, 2005.
- PIRES, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; PASSOS, F.; SAKAI, E.; SILVA, T.A.; ARRUDA, F. Produção do morangueiro em diferentes níveis de água, cobertura do solo e ambiente de cultivo. **Irriga**, v.12, n.3, p.338-353, 2007.
- QUADROS, B.R.; SILVA, E.S.; SILVA BORGES, L.; ARAÚJO MOREIRA, C.; MORO, A.L.; VILAS BOAS, R.L. Doses de Nitrogênio na produção de rabanete fertirrigado e determinação de clorofila por medidor portátil nas folhas. **Irriga**, v.15, n.4, p.353-360, 2010.
- RESH, H.M. **Hydroponic food production**: a definitive guidebook of soilless food-growing methods. 7.Ed. California: Woodbridge Press, 2012. 527p.
- RHOADES, J.D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, D.R.; NIELSEN, D.R. (Ed.). **Irrigation of Agricultural Crops**. Agronomy 30. Madison: ASA, CSSA, SSSA, p.1089-1142, 1990.
- RICHARDS, L.A. (Ed.) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Salinity Laboratory, USDA. **Agriculture Handbook**, v.60, 160p., 1954.
- ROMANINI, C.E.; GARCIA, A.P.; ALVARADO, L.M.; CAPPELLI, N.L.; UMEZU, C.K. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.14, n.11, p.1194-1201, 2010.
- ROOSTA, H.R.; SAJJADINIA, A.; RAHIMI, A.; SCHJOERRING, J.R. Responses of cucumber plant to NH_4^+ and NO_3^- nutrition: the relative addition rate technique vs. cultivation at constant nitrogen concentration. **Scientia Horticulturae**, v.121, n.4, p.397-403, 2009.
- SANJUÁN, M.C.S.; GAVILÁN, M.U. Métodos de Riego y fertirrigación em cultivo sin suelo. In: GAVILÁN, M.U. (Ed). **Tratado de cultivo sin suelo**, 3. Ed. rev. y ampl. Editora Mundi-Prensa: Madrid, Barcelona, México, 238 p., 2004.
- SCHARZ, D.; GROSCHE, R. Influence of nutrient solution concentration and a root pathogen (*Pythium aphanidermatum*) on tomato and morphology. **Scientia Horticulturae**, v.97, n.2, p.109-120, 2003.
- SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; COELHO, R.D. Salinização dos solos cultivados sob ambientes protegidos no Estado de São Paulo. In: FOLEGATTI, M. V. (Ed.). Fertirrigação: citros, flores, hortaliças. Guaíba: **Agropecuária**, p.267-277, 1999a.
- SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D. *et al.* Determinação da salinidade do solo utilizando extratores de cápsulas porosas e soluções diluídas (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, Pelotas, 1999. **Anais**. Pelotas, 1999. Pelotas: SBEA, 1999b.
- SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 136p., 2002. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- SILVA, P.F.; LIMA, C.J.G.; BARROS, A.C.; SILVA, B.M.; DUARTE, S.N. Sais fertilizantes e manejo da fertirrigação na produção de tomateiro cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1173-1180, 2013.
- SILVA, C.R.M.; SILVEIRA, M.H.D. Fertirrigação da cultura do rabanete com diferentes dosagens de nitrogênio. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15, p.946-953, 2012.
- ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. The HIDRUS 1-D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Riverside: U.S. Salinity Laboratory - Agricultural Research Service - U.S. Department of Agriculture, 2005.

- STREIT, N.M.; CANTERLE, L.P.; CANTO, M.W.D.; HECKTHEUER, L.H.H. As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, p.748-755, 2005.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.Ed. Porto Alegre: Artemed, 2013.
- TEIXEIRA, T.N. **Hidroponia**: uma alternativa para pequenas propriedades. Guaíba: Editora Agropecuária. 86p., 1996.
- THOMPSON, R.B.; MARTÍNEZ-GAITAN, C.; GALLARDO, M.; GIMÉNEZ, C.; FERNÁNDEZ, M.D. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. **Agricultural Water Management**. v.89, p.261-274, 2007.
- VILAS BOAS, R.C.; PEREIRA, G.M.; REIS, R.P.; LIMA JUNIOR, J.A.; CONSONI, R. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.4, p.781-788, 2011.
- VOX, G.; TEITEL, M.; PARDOSSI, A.; MINUTO, A.; TINIVELLA, F.; SCHETTINI, E. Sustainable greenhouse systems. Sustainable agriculture: technology, planning and management. **Nova Science Publishers**, Inc., New York, NY, USA, p.1-79, 2010.
- XU, H.L.; GAUTHIER, L.; GOSSELIN, A. Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. **Scientia Horticulturae**, v.63, n.1-2, p.11-20, 1995.
- ZOTARELLI, L.; DUKES, M.D.; SCHOLBERG J.M.; HANSELMAN, T.; LE FEMINELLA, K.; MUNOZ-CARPENA, R. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for plastic mulch bed system on a sandy soil. **Scientia Horticulturae**, v.116, n.1, p.8-16, 2008.

CAPÍTULO 8

8 SUBSÍDIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

João Carlos Cury Saad

Resumo

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional estão presentes em quase 25% das propriedades agrícolas irrigadas. Tipicamente implantados em pequenas áreas, nem sempre são adequadamente dimensionados e operados, uma vez que as características locais como formato irregular e declividade da área, dentre outras, possibilitam muitas alternativas de configuração da rede hidráulica e de operação, requerendo uma análise técnica criteriosa para que se obtenha os resultados esperados. Este capítulo visa fornecer subsídios para auxiliar profissionais envolvidos com o dimensionamento e com a operação destes sistemas, bem como para fundamentar o desenvolvimento de programas computacionais e de aplicativos objetivando incrementar a qualidade dos projetos de aspersão convencional e promover boas práticas de irrigação.

8.1 Introdução

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional são muito utilizados na irrigação de pequenas áreas, muitas vezes de agricultura familiar, atendendo as mais diversas culturas, desde hortaliças até cereais. Uma característica importante é que estes sistemas requerem mão de obra permanente para realizar o esquema operacional, que envolve a troca de posições com deslocamento da linha lateral, constituída de tubulação de engate rápido.

Por envolver pequenas áreas, normalmente com formato e declividade variáveis, tem-se muitas possibilidades de configuração da rede hidráulica, bem como de esquemas operacionais. Estes cenários de projeto nem sempre são devidamente explorados para que se tenha boas práticas de irrigação por aspersão convencional, em parte devido à falta de subsídios e de aplicativos para que os projetistas e outros técnicos possam desenvolver alternativas a serem apresentadas ao irrigante.

A analogia feita por Keller e Bliesner (1990) de que a técnica de projetar um sistema de irrigação é como a montagem de um quebra-cabeça do tipo Tangram, é muito apropriada. A arte do projetista de irrigação consiste em associar componentes individuais que se encaixam para formar um sistema de irrigação viável e adequado para uma condição local específica. Estes componentes englobam aspersores, tubulação, bomba hidráulica, motor e também processos como a sequência de mudança de posição das linhas laterais móveis, além das características locais de período diário disponível para irrigar e de disponibilidade de recursos hídricos. Tal habilidade requer experiência e conhecimento para que as condições locais sejam respeitadas e o sistema de irrigação seja efetivo.

Este capítulo visa fornecer subsídios que contribuam para o desenvolvimento desta habilidade de projetar sistemas de irrigação por aspersão convencional, incentivar o desenvolvimento de planilhas e aplicativos que agilizem, com qualidade técnica, as etapas necessárias e permitir que um número cada vez maior de técnicos pratique sua arte para que se tenha boas práticas de irrigação por aspersão convencional, no campo.

8.2 Sequência sugerida

Dada a grande liberdade de escolha que os sistemas de irrigação por aspersão convencional possibilitam, há muitos caminhos para se chegar ao projeto final, que será sempre variável de projetista para projetista. A sequência sugerida neste capítulo não pretende ser nem a única, nem a melhor alternativa, e sim um exemplo de como organizar as etapas com fundamentação em princípios consolidados e em recursos recentes. As fases propostas são: (i) escolha do espaçamento entre aspersores; (ii) definição da área efetivamente irrigada; (iii) lâmina líquida e lâmina bruta; (iv) turno de irrigação; (v) vazão do projeto; (vi) configuração da rede hidráulica; (vii) definição do esquema operacional, número de posições de operação irrigadas por dia e eventual ajuste dos dados; (viii) seleção do aspersor e suas características operacionais; (ix) dimensionamento da linha lateral; (x) dimensionamento da linha principal; (xi) dimensionamento da adutora; (xii) condição operacional crítica; (xiii) altura manométrica total e (xiv) potência do conjunto motobomba.

8.3 Espaçamento entre aspersor

A escolha do espaçamento entre aspersores na linha lateral (E1) e do espaçamento entre linhas de aspersores (E2) é fundamental para que se tenha uniformidade de aplicação de água e é dependente da velocidade média do vento. Estes espaçamentos são múltiplos de 6m pois é o comprimento usual dos tubos de irrigação.

8.4 Definição da área efetivamente irrigada

Uma vez definidos os espaçamentos E1 e E2 dos aspersores, pode-se definir a área efetivamente irrigada, sendo que a largura e o comprimento serão múltiplos dos correspondentes espaçamentos.

8.5 Lâmina líquida e lâmina bruta

A lâmina de água retida na profundidade efetiva do sistema radicular da cultura a ser irrigada que pode ser utilizada sem causar redução importante na produtividade é dada pela Equação 1. Ela será a própria lâmina líquida (L_L) de irrigação em situações em que a precipitação efetiva não for significativa ou não for considerada (como neste capítulo).

$$L_L = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) f z \quad (1)$$

ou

$$L_L = (\theta_{cc} - \theta_i) z \quad (2)$$

em que L_L se refere à lâmina líquida, em mm; θ_{cc} à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondente à condição de capacidade de campo; θ_{pmp} à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondente ao ponto de murchamento permanente; θ_i à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondente ao momento de irrigar para a cultura de interesse; f ao fator de depleção de água no solo para a cultura; z à profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

A lâmina bruta (L_b) é dada por:

$$L_b = \frac{L_L}{E_f} \quad (3)$$

em que E_f se refere à eficiência do sistema de irrigação (em valor decimal).

8.6 Turno de irrigação

O turno de irrigação é a razão entre a lâmina líquida e a evapotranspiração potencial da cultura. A operação do sistema de irrigação por aspersão convencional utilizando integralmente o turno de irrigação, implica na menor vazão horária. Um período de folga pode ser adotado dentro do turno de irrigação, quando necessário.

$$TI = \frac{L_L}{ET_c} \quad (4)$$

em que TI se refere ao turno de irrigação (dias), L_L à lâmina líquida (mm) e ET_c à evapotranspiração potencial da cultura de interesse (mm d^{-1}).

8.7 Vazão do projeto

A vazão do sistema de irrigação (Q) é estimada por:

$$Q = \frac{A ET_c}{E_f TD} \quad (5)$$

em que Q é a vazão do sistema ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), A a área do projeto (m^2), ET_c a evapotranspiração da cultura (m d^{-1}), E_f a eficiência de aplicação do sistema de irrigação (decimal), e TD o tempo disponível para irrigar (h d^{-1}).

A evapotranspiração da cultura deve ser criteriosamente estimada, considerando a maior demanda hídrica dentre os cultivos atendidos pelo sistema de irrigação, além de considerar a frequência de distribuição da evapotranspiração de referência.

A disponibilidade diária de mão de obra para a atividade de irrigar é um dado fundamental, uma vez que o sistema de aspersão convencional requer frequente mudança de posição, o que normalmente limita a atividade ao período diurno.

A vazão calculada pela Equação 5 é a de menor valor para as condições de contorno do projeto (irrigação total), pois considera que a operação do sistema de irrigação por aspersão convencional irá utilizar plenamente o turno de irrigação. Este valor seria reduzido no caso de se considerar a precipitação efetiva.

Quando se prevê um período de folga dentro do turno de irrigação, a vazão dada pela Equação 5 deve ser multiplicada pelo fator $\left(\frac{TI}{TI-\text{folga}}\right)$, com os parâmetros TI e folga em dias.

8.8 Configuração da rede hidráulica

Definir a configuração da rede hidráulica significa distribuir a tubulação na área irrigada respeitando algumas premissas práticas, como por exemplo: a) o comprimento da linha lateral deve ser igual ou submúltiplo da dimensão da área na direção da qual ela será disposta; b) o mesmo vale para as linhas laterais em relação à outra dimensão da área. Há um grande número de possibilidades, ainda mais quando a área é irregular e com desnível desuniforme. Algumas recomendações práticas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Recomendações práticas para definir a configuração da rede hidráulica.

Parâmetro	Recomendação
Soma das vazões das linhas laterais operando simultaneamente (conjunto operacional)	Deve ser aproximadamente a mesma, tanto em projetos em áreas regulares como em projetos em áreas irregulares
Área irrigada simultaneamente	Ser submúltiplo da área total
Número de horas de irrigação por conjunto operacional	Ser submúltiplo do tempo diário disponível (TD) para a atividade de irrigar

8.9 Esquema operacional, número de posições irrigadas e ajuste dos dados

Na Figura 1 são apresentados alguns exemplos de possíveis configurações hidráulicas de sistemas de irrigação por aspersão convencional, com números distintos de linhas laterais operando simultaneamente.

Em um dado projeto, as linhas laterais que operam simultaneamente formam um **conjunto operacional**, que será deslocado por diferentes posições de operação até que toda a área seja irrigada, dentro do turno de irrigação estabelecido.

O esquema operacional irá definir o número de posições de operação irrigadas por dia (NP_d), o tempo de irrigação por posição operacional e a sequência de deslocamento na área. Calcula-se NP_d por:

$$NP_d = \frac{\text{número total de posições de operação}}{TI} \quad (6)$$

Para facilitar a operação no campo, NP_d deve ser um número inteiro, de igual valor ou submúltiplo do tempo diário disponível para a atividade de irrigar (TD). Se não for, deve ser ajustado, aumentando o seu valor para atender a esta condição, o que implicará na redução do turno de irrigação. Se este ajuste gerar folga dentro do turno de irrigação, deve-se recalcular a vazão do projeto.

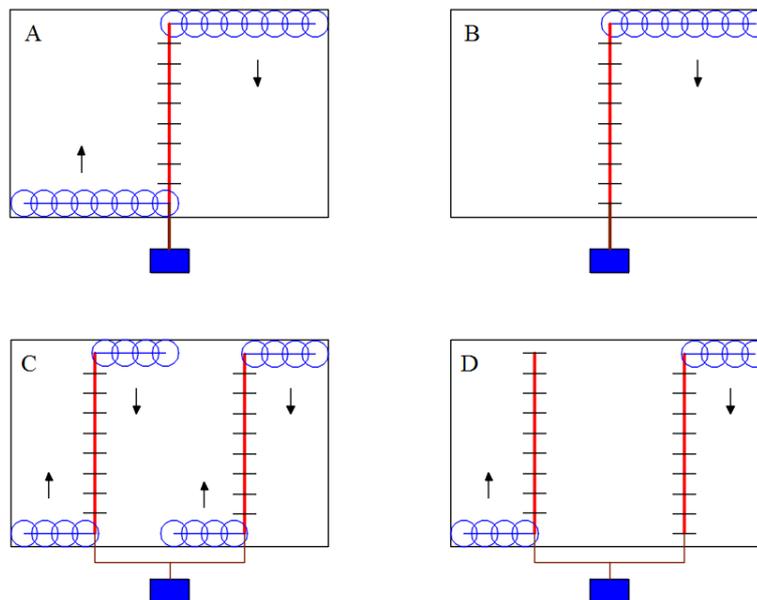


Figura 1. Algumas opções de configuração hidráulica e de esquemas operacionais em sistemas de irrigação por aspersão convencional.

8.10 Seleção do aspersor e suas características operacionais

A vazão do aspersor será calculada por:

$$q = \frac{Q}{\text{número de aspersores operando simultaneamente}} \quad (7)$$

A escolha do aspersor comercial é feita com base na vazão e nos espaçamentos E1 e E2, selecionando um modelo que atenda tais condições, preferencialmente, com uma carga de pressão intermediária, dentro da faixa recomendada pelo fabricante. Esta será a pressão de serviço do aspersor ($H_{\text{serviço}}$), que terá importância fundamental no critério de dimensionamento da linha lateral.

8.11 Hidráulica de tubulações com múltiplas saídas

Na sequência, tem-se o dimensionamento da rede hidráulica, começando pela linha lateral. As linhas laterais de aspersores são tubulações com múltiplas saídas e suas características hidráulicas estão bem definidas em Scaloppi e Allen (1993).

8.11.1 Cálculo da perda de carga

A estimativa da perda de carga (hf) é fundamental no dimensionamento da rede hidráulica de sistemas de irrigação pressurizados. A equação de Darcy-Weisbach (Equação 8), devido à sua acurácia e ampla faixa de aplicação (BROWN, 2002), é predominantemente recomendada (LIOU, 1998).

$$hf = \frac{8 f L Q^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (8)$$

em que: hf é a perda de carga (mca); L é o comprimento da tubulação (m); Q é a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); D é o diâmetro interno da tubulação (m); g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{m s}^{-2}$); f é o fator de atrito.

A necessidade de estimar o fator de atrito, f , já foi considerada a principal limitação ao amplo uso da equação Darcy-Weisbach, porém com a evolução dos recursos computacionais e mesmo de aplicativos para smartphones, esta restrição é cada vez menos significativa. A busca por uma única equação explícita que represente todas as regiões do Diagrama de Moody e estime adequadamente o fator de atrito para quaisquer combinações de Número de Reynolds (Re) e de rugosidade relativa do tubo (ε), é tema de pesquisa continuamente estudado (PIMENTA *et al.*, 2018; MINHONI *et al.*, 2020).

A Equação 9, proposta por Swamee e Jain (1976), é recomendada para as faixas de $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$ e $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^8$, com erros inferiores a $\pm 1\%$ em relação ao fator de atrito f calculado pela equação de Colebrook-White, considerada como referência, porém nem sempre adotada por ser uma equação implícita.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (9)$$

Para a viscosidade cinemática da água (ν) de $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, o número de Reynolds é dado por:

$$Re = 1,26 \cdot 10^6 \frac{Q}{D} \quad (10)$$

em que ε é a rugosidade absoluta do tubo, em m.

Para a elaboração de planilhas, programas computacionais e aplicativos de smartphones, recomenda-se a equação de Vatankhah (2018) para estimar o coeficiente de atrito f , dada sua precisão em todo a abrangência do Diagrama de Moody (MINHONI *et al.*, 2020), ou seja, para todas as combinações úteis de Re e de $\frac{\varepsilon}{D}$, sendo representada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \cdot \ln \left[\frac{0,3984 \cdot Re}{(0,8686 s)^{\frac{s-0,645}{s+0,39}}} \right] \quad (11)$$

com $s = 0,12363 Re \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,3984 Re) \quad (12)$

Perda de carga em tubulações com múltiplas saídas

As equações de perda de carga, como a de Darcy-Weisbach, aplicam-se a tubulações em que a vazão (Q) é constante ao longo do comprimento (L), de diâmetro (D) único. Em tubulações com múltiplas saídas, como é o caso das linhas laterais de aspersão convencional, a vazão que flui decresce a cada saída (aspersor), sendo que a perda de carga total pode ser estimada de duas formas: calculando trecho a trecho ou calculando para o comprimento total e aplicando um fator de correção.

8.11.2 Método trecho a trecho

Consiste em aplicar a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach em cada trecho da tubulação e calcular a perda de carga total pelo somatório das perdas de carga nos trechos.

$$hf_L = \sum_{n=1}^N hf_n \quad (13)$$

sendo: hf_L = perda de carga total na tubulação com múltiplas derivações, em mca; hf_n = perda de carga no trecho n , calculada pela equação de Darcy-Weisbach, em mca; n = número do trecho ($n = 1$ a N).

8.11.3 Fator de correção para múltiplas saídas

Calcula-se a perda de carga com a equação de Darcy-Weisbach considerando que a vazão total percorre todo o comprimento L , de diâmetro D , ou seja, como se não houvesse derivações. O valor obtido é corrigido para o caso de múltiplas saídas, multiplicando pelo fator de correção de perda de carga, F_a , desenvolvido por Scaloppi (1988). Desta forma:

$$hf_L = hf \cdot F_a \quad (14)$$

$$F_a = \frac{(N \cdot F) + x - 1}{N + x - 1} \quad (15)$$

com $x = \frac{\text{distância do primeiro aspersor}}{\text{distância regular entre os demais aspersores}} \quad \text{sendo } x \leq 1 \quad (16)$

em que: hf = perda de carga com a vazão total percorrendo todo o comprimento L no diâmetro D , calculada pela equação de Darcy-Weisbach, em mca; N = número de saídas (derivações ou aspersores); F = fator de correção de perda de carga de Christiansen.

O fator de correção F_a está fundamentado no fator F de Christiansen (Eq. 17) e tem como vantagem ampliar sua aplicabilidade, uma vez que pode ser adotado para qualquer distância da primeira saída (aspersor), ou seja, para qualquer valor de x (Eq. 16).

O fator de correção F de Christiansen (1942), considera que a primeira derivação dista do início da tubulação, a mesma distância regular entre os demais aspersores na linha lateral, ou seja, $x = 1$, e é calculado por:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2.N} + \frac{(m-1)^{0.5}}{2.N} \quad (17)$$

em que: m = expoente da velocidade na equação de perda de carga utilizada. Para a equação de Darcy-Weisbach, $m = 2$.

8.11.4 Perda de carga em tubulação com dois diâmetros e múltiplas saídas

Na Figura 2 tem-se uma tubulação de irrigação com dois trechos, L_1 e L_2 , com os respectivos diâmetros, D_1 e D_2 , e número de saídas N_1 e N_2 .

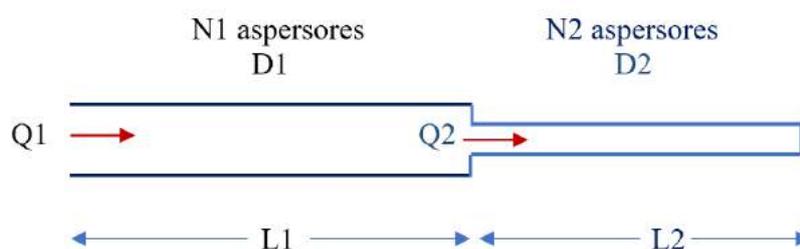


Figura 2. Representação esquemática da tubulação com múltiplas derivações e dois diâmetros.

O fator de correção F (CHRISTIANSEN, 1942) foi desenvolvido assumindo que todas as saídas tinham a mesma vazão e que a vazão total de entrada era totalmente descarregada pelas derivações, ou seja, não haveria mais fluxo após a última saída da tubulação ou do trecho da tubulação. Ao desenvolver o fator F_a , Scaloppi (1988) manteve estas premissas. Desta forma, não se pode aplicar F ou F_a diretamente nos dois trechos de diâmetros distintos, mas somente no segmento final. Keller e Bliesner (1990) apresentaram um procedimento indireto, caracterizado por 3 etapas de cálculo, que permite contornar esta situação e utilizar estes coeficientes, calculando a perda de carga em uma tubulação com dois diâmetros e com múltiplas saídas (hf_{LT}) por:

$$hf_{LT} = hf_A - hf_B + hf_C \quad (18)$$

em que hf_A é a perda de carga calculada com D_1 , Q_1 o comprimento total da linha lateral (L_1+L_2), multiplicada pelo F_a de Scaloppi, utilizando o número total de saídas (N_1+N_2), hf_B a perda de carga calculada com D_1 , Q_2 e L_2 , multiplicada por F_a estimado com $x = 1$ e N_2 (número de aspersores no trecho 2), hf_C a perda de carga calculada com D_2 , Q_2 e L_2 , multiplicada por F_a adotando $x = 1$ e N_2 .

8.11.5 Carga de pressão na tubulação com múltiplas saídas

A carga de pressão em qualquer ponto s da tubulação com múltiplas saídas é dada por:

$$H_s = H_0 - hf_s - d_s \quad (19)$$

em que H_s se refere à carga de pressão a uma distância s do início da tubulação com múltiplas saídas (m); H_0 à carga de pressão na entrada da tubulação (m); hf_s à perda de carga do início da tubulação até a distância s (m); d_s à diferença de cota entre o início da tubulação e o ponto s (m); s à distância em relação ao início da tubulação (m).

O componente carga de velocidade não é considerado na Equação 19 e nas demais que derivam de sua utilização.

Se a declividade da tubulação sobre o terreno for uniforme, pode-se utilizar:

$$d_s = S_0 \cdot s \quad (20)$$

em que S_0 = declividade média (uniforme) da tubulação sobre o terreno, em $m \cdot m^{-1}$. Por convenção adotada neste capítulo, S_0 é positivo para a cota e negativo para a declividade em declive.

A perda de carga do início da tubulação até a distância s pode ser estimada por (SCALOPPI; ALLEN, 1993):

$$hf_s = hf_L \left[1 - \left(1 - \frac{s}{L} \right)^3 \right] \quad (21)$$

O expoente 3 da Equação 21 é decorrente de $(m+1)$, em que m é o expoente da velocidade na equação de perda de carga utilizada (neste capítulo, $m = 2$; equação de Darcy-Weisbach).

8.11.6 Carga de pressão média na tubulação com múltiplas saídas

A carga de pressão média na tubulação com múltiplas saídas é dada por:

$$H_{med} = H_0 - 0,75 hf_L - \frac{d_L}{2} \quad (22)$$

em que H_{med} é a carga de pressão média na tubulação com múltiplas saídas, em mca; hf_L = perda de carga total na tubulação, mca; d_L = diferença de cota entre o início e o final da tubulação, em m.

Quando a declividade for uniforme, pode-se utilizar $(S_0 \cdot L)$ no lugar de d_L .

A localização da carga de pressão média é dada pela Tabela 2.

Tabela 2. Localização da carga de pressão média conforme a condição de declividade.

Condição	Localização do H_{med}
Em nível e $m = 2$	0,37 de L
Em desnível (active ou declive)	Variável

8.11.7 Cargas de pressão máxima e mínima na tubulação com múltiplas saídas

Para poder calcular as cargas de pressão máxima e mínima na tubulação com múltiplas saídas é preciso saber a localização das mesmas, que varia conforme a condição de desnível.

Em tubulações em nível e em a cota a carga de pressão máxima está no início da linha e a mínima, no final:

$$H_x = H_0 \text{ e } H_n = H_f \quad (23)$$

em que H_x é a carga de pressão máxima na tubulação (m), H_n a carga de pressão mínima na tubulação (m), e H_f a carga de pressão no final da tubulação (m).

No entanto, em tubulações com múltiplas saídas e em declive, há diversas possibilidades de perfis de pressão em função da declividade e da perda de carga, com

diferentes posicionamentos das cargas de pressão máxima e mínima, conforme pode ser verificado em Wu *et al.* (1983).

8.11.8 Variação de pressão e de vazão

A variação de vazão (Δq) na linha lateral de aspersão convencional é um importante indicador da qualidade do dimensionamento, uma vez que um projeto é considerado adequado quando apresenta $\Delta q \leq 10\%$.

$$\Delta q = \frac{(q_x - q_n)}{q_x} \quad (24)$$

em que: q_x é a vazão máxima na linha lateral; q_n é a vazão mínima na linha lateral.

Pode-se também avaliar a linha lateral de aspersores pela variação carga de pressão, dada por:

$$\Delta H = \frac{(H_x - H_n)}{H_x} \quad (25)$$

Para um dado aspersor, tem-se:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \quad (26)$$

ou, neste caso:

$$\frac{q_x}{q_n} = \frac{\sqrt{H_x}}{\sqrt{H_n}} \quad (27)$$

Combinando as Equações 24, 25 e 26 obtém-se que:

$$\Delta q = 10\% \text{ equivale a } \Delta H = 19\% \quad (28)$$

Considerando que é mais fácil medir a carga de pressão do que a vazão em diferentes pontos de uma tubulação, pode-se inferir que sempre que $\Delta H \leq 19\%$, tem-se $\Delta q \leq 10\%$.

8.12 Dimensionamento da linha lateral

8.12.1 Critérios de dimensionamento

O dimensionamento das linhas laterais de aspersão convencional, proposto neste capítulo, está fundamentado em dois critérios básicos: (i) que a variação de vazão seja de, no máximo, 10% (KELLER; BLIESNER, 1990), e (ii) que a carga de pressão média na tubulação seja igual à pressão de serviço do aspersor mais a altura da haste, quando houver.

Resumo dos critérios:

$$\Delta q \leq 10\% \text{ e } H_{\text{med}} = H_{\text{serviço}} + H_h \quad (29)$$

em que: $H_{\text{serviço}}$ se refere à carga de pressão de serviço (ou de operação) do aspersor (mca), correspondente ao valor médio do intervalo de operação recomendado pelo fabricante; H_h à altura da haste (m).

Nesta etapa do projeto, diversas variáveis da linha lateral já foram definidas, como: vazão de entrada, comprimento da tubulação, rugosidade absoluta do tubo e número de aspersores. O critério de dimensionamento de $\Delta q \leq 10\%$ irá definir qual

deve ser a perda de carga máxima admissível na linha lateral para que este limite seja respeitado. Com isso, a única variável que resta ser determinada é o diâmetro da tubulação.

Como converter o critério de $\Delta q \leq 10\%$ em perda de carga máxima admissível na linha lateral contendo os aspersores? Esta conversão dependerá da condição topográfica da tubulação.

8.12.1.1 Linha lateral em nível: critério de dimensionamento

Para converter o critério de, no máximo, 10% de variação de vazão na linha lateral em correspondente perda de carga total, adotou-se as seguintes premissas: (i) $\Delta q = 10\%$ equivale a $\Delta H = 19\%$, (ii) nas linhas laterais em nível, H_x está no início da tubulação e H_n , no final, (iii) H_{med} é dado pela Eq. 22 e que $H_{med} = H_{serviço} + H_h$, e (iv) ΔH é dado pela Eq. 24.

Desta forma:

$$H_x = H_0 = H_{med} + 0,75 hf_L \text{ e } H_n = H_{final} = H_{med} - 0,25 hf_L \quad (30)$$

$$\text{Sendo } \Delta H = \frac{(H_x - H_n)}{H_x}, \text{ tem-se:} \quad (31)$$

$$0,19 = \frac{(H_{med} + 0,75 hf_L) - (H_{med} - 0,25 hf_L)}{H_{med} + 0,75 hf_L} \quad (32)$$

Portanto, para a condição em nível:

$$hf_L = 0,22 H_{med} \quad (33)$$

ou

$$hf_L = 0,22 (H_{serviço} + H_h) \quad (34)$$

8.12.1.2 Linha lateral em aclave: critério de dimensionamento

As mesmas considerações feitas para a condição em nível são válidas para a situação em aclave, diferindo quanto à estimativa de H_{med} , que será dada por:

$$H_x = H_0 = H_{med} + 0,75 hf_L + \frac{d_L}{2} \quad (35)$$

$$H_n = H_{final} = H_{med} - 0,25 hf_L - \frac{d_L}{2} \quad (36)$$

Portanto, para a condição EM ACLIVE:

$$hf_L = 0,22 H_{med} - 1,06 d_L \quad (37)$$

ou

$$hf_L = 0,22 (H_{serviço} + H_h) - 1,06 d_L \quad (38)$$

Novamente, quando declividade da tubulação sobre o terreno for uniforme, pode-se utilizar ($S_0 L$) no lugar de d_L .

8.12.1.3 Linha lateral em declive: critério de dimensionamento

No caso de linhas laterais em declive, não há uma equação única que estabeleça a relação entre hf_L e H_{med} , uma vez que a localização de H_x e H_n é variável conforme o perfil de pressão, que é função da perda de carga total e da declividade da tubulação.

8.12.2 Determinação do diâmetro da linha lateral às condições em nível e em aclave

Tanto para a linha lateral em nível, quanto para a linha lateral em aclave, uma vez que se conhece a vazão de entrada, o comprimento, a rugosidade absoluta do tubo, o número de aspersores e a perda de carga total (hf_L) que gera Δq de 10%, resta determinar o diâmetro interno da tubulação, que pode ocorrer de duas formas: analiticamente, obtendo-se um diâmetro teórico que será aproximado para o diâmetro comercial superior mais próximo; ou por um processo de tentativas utilizando diâmetros comerciais e verificando qual deles mais se aproxima do hf_L correspondente a $\Delta q = 10\%$.

8.12.2.1 Determinação analítica do diâmetro da linha lateral

Combinando a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach com a equação para cálculo do coeficiente f desenvolvida por Swamee & Jain (1976), tem-se:

$$D = 0,66 \cdot \left[\varepsilon^{1,25} \left(\frac{L Q^2}{h_f g} \right)^{4,75} + \nu Q^{9,4} \left(\frac{L}{h_f g} \right)^{5,2} \right]^{0,04} \quad (39)$$

em que: ν = viscosidade cinemática da água = $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

A Equação 39 é válida para $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3 \cdot 10^8$ e $2 \cdot 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 2 \cdot 10^{-2}$ e tem erro de $\pm 2\%$. Um procedimento analítico mais preciso é encontrado em Babajimopoulos e Terzidis (2013).

8.12.2.2 Definição do diâmetro da linha lateral por tentativas

Pode-se também testar diâmetros comerciais e verificar qual deles resulta em perda de carga na linha lateral (hf_L) que mais se aproxima do valor que representa $\Delta q = 10\%$.

8.12.3 Determinação do diâmetro da linha lateral para a condição em declive

A condição em declive permite diversos perfis de pressão, dependendo da perda de carga total e da declividade da tubulação, com as cargas de pressão máxima e mínima em diferentes posições da linha lateral, o que impossibilita o estabelecimento de uma equação única para correlacionar hf_L e H_{med} , de tal forma que se tenha $\Delta q = 10\%$.

A planilha SLIDE (Figura 3) foi desenvolvida por Andrini *et al.* (2019) para subsidiar o dimensionamento de linhas laterais de aspersão convencional em qualquer condição topográfica, inclusive em declive. Na Figura 3 tem-se os dados de entrada requeridos e os dados de saída, a saber: carga de pressão no início da linha lateral, carga de pressão máxima, carga de pressão mínima, carga de pressão média, variação de pressão, variação de vazão, perfil de carga de pressão e seu tipo segundo a classificação apresentada por Wu *et al.* (1983). De forma interativa, é possível testar diferentes possibilidades de dimensionamento alterando as variáveis de entrada e verificando a variação de vazão correspondente, que deve ser inferior a 10%.

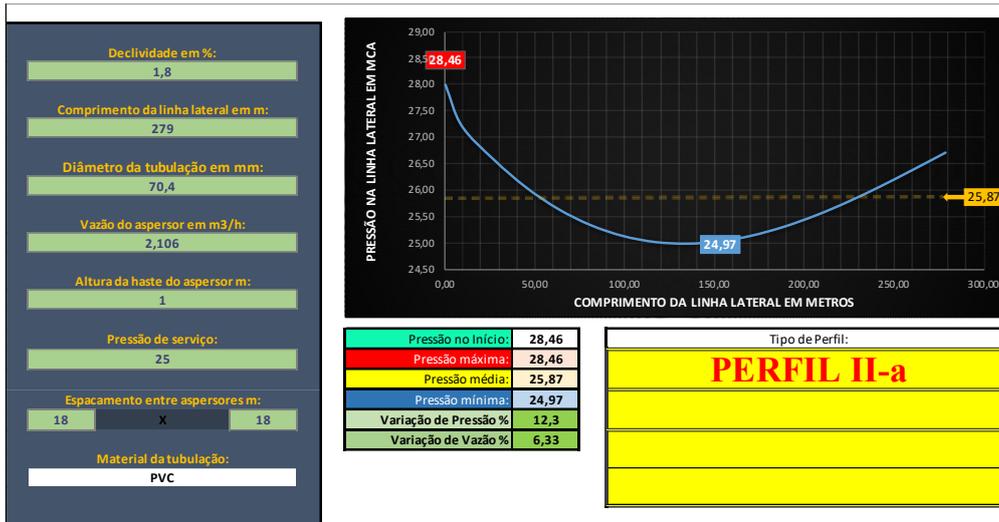


Figura 3. Planilha SLIDE (ANDRINI *et al.*, 2019) para dimensionamento de linhas laterais de aspersão convencional em qualquer condição de declividade uniforme.

8.12.4 Linhas laterais emparelhadas em desnível

Denomina-se de linhas emparelhadas (Figura 4) quando as tubulações (linhas laterais) se estendem em direção opostas na linha principal, sendo usual que tenham o mesmo diâmetro. O dimensionamento de linhas laterais emparelhadas em terrenos com declividade uniforme consiste em definir o comprimento dos trechos em active em declive, tendo o mesmo diâmetro e aproximadamente a mesma carga de pressão mínima.

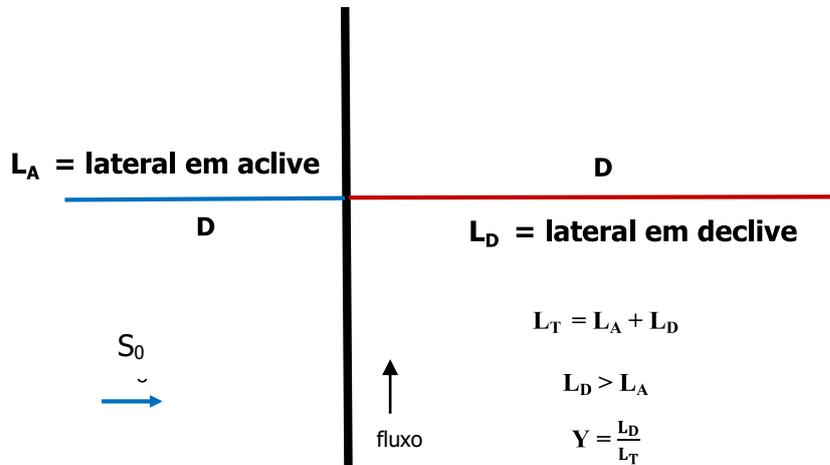


Figura 4. Linhas laterais emparelhadas.

No caso de linhas laterais emparelhadas em condição em nível, a linha principal estará situada no centro e os dois trechos terão o mesmo comprimento e o mesmo diâmetro. Neste caso, define-se o diâmetro pela metodologia já apresentada.

No caso de linhas laterais emparelhadas em condição de declividade uniforme, adota-se o mesmo diâmetro que se teria na condição em nível seguindo a metodologia apresentada anteriormente. O passo seguinte é determinar quais serão os comprimentos dos trechos em active (L_A) e em declive (L_D), de tal a forma a compensar os efeitos da declividade com $L_D > L_A$ e assegurar a mesma carga de pressão mínima em ambos. Adaptando a metodologia proposta por Keller e Bliesner (1990) para

determinar a melhor posição da linha de derivação de sistemas de irrigação por gotejamento em terreno inclinado, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{S_0 \cdot L_T}{hf_L} \cdot \left[1 - \left(\frac{F_a \cdot S_0 \cdot L_T}{hf_L} \right)^{0,5} \right] + \left(\frac{F_a \cdot S_0 \cdot L_T}{hf_L} \right)^{1,5} = Y^3 - (1-Y)^3 \quad (40)$$

em que Y se refere à fração do comprimento total correspondente ao trecho em declive; S_0 = declividade média (uniforme) da tubulação sobre o terreno, em $m \cdot m^{-1}$, L_T ao comprimento total (trecho em aclave + trecho em declive), em m, hf_L à perda de carga da tubulação com múltiplas saídas (mca) de comprimento L_T , com vazão de entrada equivalente à soma dos trechos em aclave e em declive, e F_a ao fator de Scaloppi (adimensional).

O elevado valor de hf_L utilizado na Equação 40 é pouco usual, pois é decorrente de uma condição hipotética representada pela perda de carga (hf) estimada pela equação de Darcy-Weisbach para uma tubulação de comprimento L_T , que é a soma dos trechos em aclave e em declive, transportando a vazão Q_T (soma das vazões dos trechos em aclave e em declive), em um diâmetro único (igual ao que se teria na condição em nível). Para se estimar hf_L , deve-se multiplicar hf pelo coeficiente F_a , obtido com $x=1$ e N equivalente a soma total de aspersores (equivalente ao comprimento L_T).

A Equação 40 preconiza que se tenha a mesma carga de pressão mínima nos trechos em aclave em declive, gerando variação de vazão muito semelhante entre as linhas emparelhadas. Ela também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{S_0}{S_f F_a} \left[1 - \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{0,5} \right] + \left(\frac{S_0}{S_f} \right)^{1,5} = Y^3 - (1 - Y)^3 \quad (41)$$

em que: S_f é a declividade da linha de energia da tubulação (ou gradiente de perda de carga de pressão), em mca m^{-1} , sendo calculada por $S_f = \frac{hf}{L_T}$.

Os trechos em declive e em aclave serão calculados por:

$$L_d = Y \cdot L_T \quad (42)$$

$$L_a = L_T - L_d \quad (43)$$

em que L_d se refere ao comprimento da linha lateral em declive (m); L_a ao comprimento da linha lateral em aclave (m).

É necessário ajustar o valor de L_d obtido pela Equação 42 para que se tenha um número inteiro de aspersores no trecho.

8.13 Condição operacional crítica

Considerando a sequência de deslocamento das linhas laterais que irrigam simultaneamente nas diferentes posições de operação da área irrigada, definida anteriormente no item 7.9, deve-se identificar a condição mais crítica, ou seja, aquela que requer a maior carga de pressão no início da linha principal (primeira derivação, H_1). Isto é fundamental para calcular a altura manométrica total e também para dimensionar as linhas de alimentação (secundária ou principal).

8.14 Dimensionamento da linha principal

Para dimensionar a linha principal e também as secundárias (se houver), pode-se adotar o critério da velocidade máxima, que deve ser inferior a $2m \cdot s^{-1}$. Quando possível, deve-se utilizar mais de um diâmetro.

8.15 Cálculo da altura manométrica total

A altura manométrica total corresponde à carga de pressão que o conjunto motobomba deve fornecer para assegurar H_0 na posição mais crítica. Para isso, deve-se considerar todas as perdas de carga e as perdas (e ganhos, se houver) por desnível desde a bomba até a linha lateral na condição mais crítica. Ao valor total calculado, deve-se acrescentar 5% para compensar as perdas de carga localizadas.

8.16 Potência do conjunto motobomba

Com a vazão do projeto (Q , $m^3 s^{-1}$) e a altura manométrica (H_{man} , m), seleciona-se um modelo de bomba hidráulica que atenda tais características, com o melhor rendimento.

A potência líquida do motor será dada por:

$$\text{Potência líquida (CV)} = \frac{9,81 Q H_{man}}{0,735 \eta_b \eta_m} \quad (44)$$

em que η_b se refere ao rendimento da bomba hidráulica (decimal), e η_m o rendimento do motor elétrico (decimal).

A potência bruta será a potência líquida multiplicada por um fator de segurança, denominado de reserva de potência, sendo que o valor obtido irá orientar a escolha do motor comercialmente disponível.

8.17 Estudo de caso: dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão convencional com linhas laterais emparelhadas em desnível

A área do projeto está representada na Figura 5, tendo dimensões de 440m por 180m, na qual pretende-se irrigar a cultura do feijão pelo sistema de irrigação por aspersão convencional. Dados: (i) profundidade efetiva do sistema radicular: 40cm; (ii) umidade na capacidade de campo: $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; (iii) umidade no ponto de murchamento permanente: $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; (iv) fator de depleção (f): 0,5; (v) evapotranspiração da cultura: $5,2 \text{ mm d}^{-1}$; (vi) eficiência de aplicação: 80%; (vii) tempo diário disponível para a atividade de irrigar (TD): 10 h; (viii) altura da haste: 1 m; e (ix) a precipitação efetiva não será considerada e nem o período de folga entre turnos de irrigação.

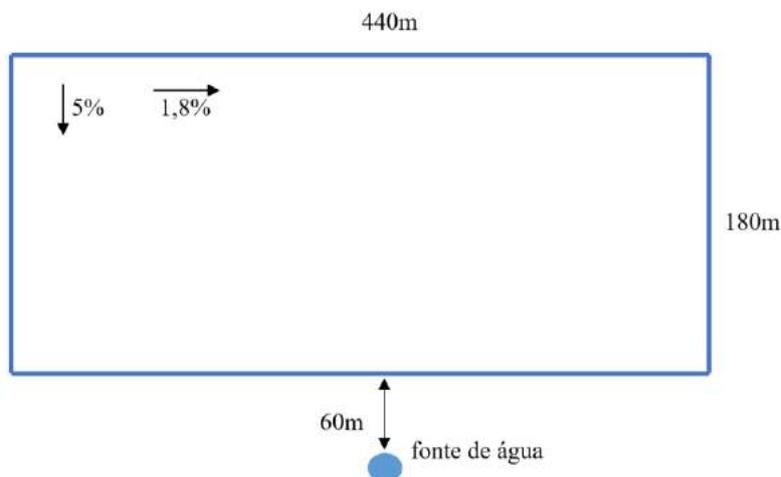


Figura 5. Croqui da área do projeto.

8.17.1 Espaçamento entre emissores

Considerando as dimensões da área e que os ventos são moderados, escolheu-se o espaçamento entre aspersores de 18 m por 18 m.

8.17.2 Área efetivamente irrigada

Ajustando a área original para que se tenha um número inteiro tanto de aspersores na linha lateral, como de linhas laterais, obteve-se 432 m x 180 m.

8.17.3 Lâmina líquida e lâmina bruta

$$L_L = (0,38 - 0,22) \times 0,5 \times 400 \text{ mm} = 32 \text{ mm} \quad (45)$$

$$L_b = \frac{32 \text{ mm}}{0,80} = 40 \text{ mm} \quad (46)$$

Cálculo do turno de irrigação

$$\text{Turno máximo de irrigação} = \frac{L_L}{ET_c} = \frac{32}{5,2} = 6,15 \text{ dias} \cong 6 \text{ dias} \quad (47)$$

8.17.4 Cálculo da vazão do projeto

$$Q = \frac{A \cdot ET_c}{Ef \cdot NI} = \frac{432 \text{ m} \times 180 \text{ m} \times 0,0052 \text{ m/d}}{0,8 \times 10 \text{ h/d}} = 50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \quad (48)$$

8.17.5 Definição da configuração da rede hidráulica e do esquema operacional

A linha principal será disposta na direção dos 180 m, operando em aclave, tendo linhas laterais em aclave e em declive, ou seja, linhas laterais emparelhadas.

A maior direção (432m) permite 24 aspersores com espaçamento de 18m, que serão oportunamente distribuídos entre as linhas laterais em aclave e em declive.

Há diversas configurações possíveis da rede hidráulica, sendo que algumas foram representadas na Figura 1, no item 7.9. A opção selecionada para este Estudo de Caso é semelhante àquela da Figura 1A, com duas linhas laterais operando simultaneamente e constituindo o conjunto operacional, sendo que o deslocamento se dá em sentido opostos, começando das extremidades da área. No entanto, dada a declividade, serão linhas emparelhadas de comprimentos diferentes, seguindo o esquema operacional que está detalhado na Figura 6, no qual operam simultaneamente duas laterais de mesma numeração (cor), sendo uma em aclave e outra em declive, deslocando-se em sentidos opostos.

Para dimensionar linhas laterais emparelhadas em desnível, deve-se inicialmente calcular o diâmetro como se elas tivessem o mesmo comprimento e operassem em nível. Desta forma, a linha principal estaria no centro da área, com linhas laterais em ambos os lados, de mesmo comprimento (207 m), tendo cada uma 12 aspersores, sendo que o primeiro estaria a 9m do ponto de derivação. Assume-se também que o final da linha lateral dista do limite da área o equivalente à metade do espaçamento regular entre emissores, ou seja, $\frac{18}{2} = 9 \text{ m}$.

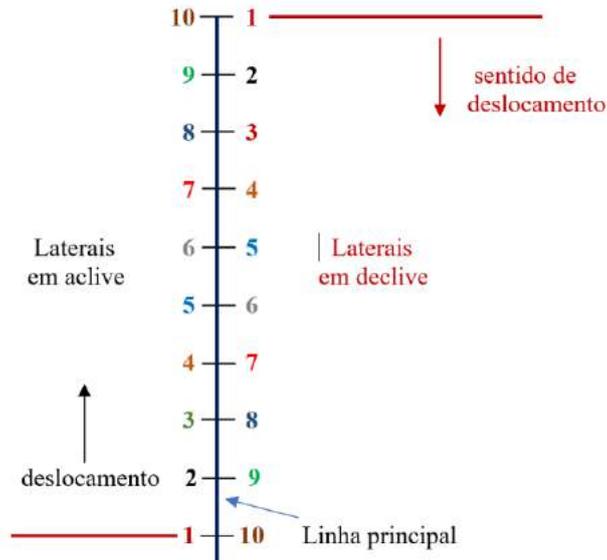


Figura 6. Esquema operacional, em que operam simultaneamente duas linhas laterais de mesma numeração (cor), sendo uma em aclive e outra em declive, deslocando-se em sentidos opostos.

8.17.6 Definição das condições operacionais dos aspersores

Na Tabela 3 tem-se a definição das condições operacionais dos aspersores. Selecionou-se um aspersor comercial que fornece $2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e é recomendado para o espaçamento $18\text{m} \times 18\text{m}$. O modelo escolhido tem as seguintes características: (i) aspersor com dois bocais: 4mm e $4,6 \text{ mm}$, e (ii) vazão de $2,085 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ na carga de pressão de 25 m .

Para se ter $q = 2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ será necessário $H = 25,5 \text{ m}$ (Eq. 26).

Tabela 3. Definição das condições operacionais dos aspersores.

Item	Valor
Nº de aspersores por conjunto operacional (linhas laterais operando simultaneamente)	$\frac{432\text{m}}{18\text{m}} = 24$
Vazão do projeto (Q)	$50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Vazão do aspersor (q) para $H_{\text{serviço}} = 25,5 \text{ mca}$	$\frac{50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}}{24 \text{ aspersores}} = 2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Número total de posições de operação	10
Tempo disponível para irrigar/dia (TD; dado de entrada)	10 h
Turno de irrigação (TI)	6 d
Número de posições de operação irrigadas por dia (NP_d)	$\frac{10 \text{ posições de operação}}{6 \text{ d}} = 1,67 \text{ posições/d}$
Ajuste:	2 posições de operação/d
Aproxima-se NP_d para o inteiro superior que seja submúltiplo do TD	Tempo por posição de operação = 5h Turno ajustado = $\frac{10 \text{ posições}}{2 \text{ posições/d}} = 5 \text{ d}$
	Lâmina líquida ajustada = $5\text{d} \times 5,2 \text{ mm/d} = 26 \text{ mm}$
	Lâmina bruta = $32,5 \text{ mm}$
Intensidade de aplicação de água do aspersor	$\frac{32,5 \text{ mm}}{5 \text{ h}} = 6,5 \text{ mm h}^{-1}$

8.17.7 Dimensionamento das linhas laterais como se estivessem em nível

As linhas emparelhadas em aclave e em declive terão o mesmo diâmetro, que corresponde àquele que se teria caso as linhas estivessem em nível. Desta forma, deve-se determinar o diâmetro da linha lateral em nível, com base nos seguintes dados: (i) comprimento: 207 m, (ii) número de aspersores: 12, (iii) vazão de entrada: $12 \times 2,106 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 25,27 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, (iv) altura da haste: 1 m, e (v) rugosidade absoluta da tubulação de PVC: 0,00334 mm (ROCHA *et al.*, 2017).

Pelo critério de variação de vazão de 10% na linha lateral em nível, tem-se que a perda de carga deve ser de, no máximo:

$$hf_L = 0,22 (H_{\text{serviço}} + H_h) \quad \text{em nível} \quad (49)$$

Portanto:

$$hf_L = 0,22 \times (25,5 + 1) = 5,83 \text{ mca} \quad (50)$$

A etapa seguinte consiste em determinar qual o diâmetro da tubulação da linha lateral que atenderá este conjunto de condições. Pode-se determinar este diâmetro de duas formas: (i) testando diâmetros comerciais para verificar qual deles gera hf_L próximo de 5,83 mca; (ii) utilizando a Equação 39 para definir o diâmetro teórico que gera $hf_L = 5,83 \text{ mca}$ e aproximar para o diâmetro comercial imediatamente superior.

Para $N = 12$ e primeiro aspersor a 9 m, tem-se que: $x = 0,5$, $F = 0,3762$ e $Fa = 0,3490$. Desta forma:

$$hf = \frac{5,83 \text{ mca}}{0,3490} = 16,70 \text{ mca} \quad (51)$$

Pela Eq. 39, obtém-se: $D = 61,8 \text{ mm}$. O diâmetro comercial mais próximo de tubo de engate rápido em PVC é DN 75, com diâmetro interno de 70,4mm. Com $D = 0,0704\text{m}$, tem-se: $hf = 8,46 \text{ mca}$ e $hf_L = 2,95 \text{ mca}$ (menor que o valor corresponde a Δq de 10%, que era de 5,83 mca).

8.17.8 Dimensionamento das linhas laterais em declividade

Utilizando o diâmetro de 70,4mm obtido para a linha lateral em nível, determina-se os comprimentos dos trechos em aclave e em declive, com base na Eq. 40 (ou Eq. 41). Os dados de entrada são: $D = 0,0704\text{m}$; declividade na direção das linhas laterais (S_0) = 0,018m/m; $Q_T = 50,54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L_T = 2 \times 207 = 414\text{m}$; $Fa = 0,354$ correspondente a $N = 24$, $m = 2$ e $x = 1$; $hf = 59,8 \text{ mca}$ referente à perda de carga com Q_T em toda o comprimento L_T , de diâmetro único igual a 0,0704m; $hf_L = 21,2 \text{ mca}$. Substituindo-se estes valores na Eq. 40, obtém-se:

$$Y^3 - (1 - Y)^3 = 0,271 \quad \Rightarrow \quad Y = 0,673 \quad (52)$$

$$\text{Portanto:} \quad L_D = Y \cdot L_T = 0,673 \times 414\text{m} = 278,6 \text{ m} \quad (53)$$

Ajustando L_D para um número inteiro de aspersores, com o primeiro aspersor na metade do espaçamento regular, tem-se $L_D = 279 \text{ m}$ com 16 aspersores, sendo o primeiro a 9m do início da linha e os demais regularmente espaçados de 18m; a vazão de entrada (Q_D) é de $33,70 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Consequentemente, $L_A = 135\text{m}$, com 8 aspersores, sendo o primeiro a 9m do início das linhas e os demais regularmente espaçados de 18m; vazão de entrada (Q_A) de $16,84 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

A carga de pressão no início da linha lateral (H_0) será a mesma para o trecho em aclave e para o trecho em declive. No entanto, deve ser calculada para o trecho em aclave utilizando a Eq. 22, considerando que $H_{\text{serviço}} = 25,5 \text{ mca}$, a altura da haste é de

1m e hf_L é de 0,95 mca (obtido com $L_A = 135\text{m}$, $Q_A = 16,84\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$, $D = 0,0704\text{m}$, $N = 8$ e $Fa = 0,3583$):

$$H_0 = 25,5 + 1 + (0,75 \times 0,95) + (135 \times 0,018)/2 = 28,43\text{ mca} = 28,4\text{ mca} \quad (54)$$

Para a linha lateral em declive, será o mesmo valor de H_0 , ou seja, 28,4 mca. Utilizando uma planilha Excel para calcular a carga de pressão em cada aspersor da linha em aclave e da linha em declive, obteve-se a variação de pressão (ΔH) para cada segmento (Tabela 4).

Verifica-se que as variações de vazão nas linhas laterais em aclave e em declive foram muito próximas e ficaram abaixo de 10%, conforme o recomendado. Portanto, a metodologia de Keller e Bliesner (1990), representada pela Eq. 40, foi eficaz em atribuir, aproximadamente, a mesma pressão mínima nos trechos em aclave e em declive (Figura 7).

Tabela 4. Características das linhas laterais emparelhadas, em aclave e em declive.

Item	Linhas Laterais Emparelhadas	
	Aclave	Declive
Comprimento (m)	135	279
Número de aspersores	8	16
Vazão ($\text{m}^3\text{ h}^{-1}$)	16,84	33,70
Pressão na entrada (m)	28,4	28,4
Pressão mínima (m)	25,0	24,9
Variação de pressão (%)	12,0	12,3
Variação de vazão (%)	6,2	6,4

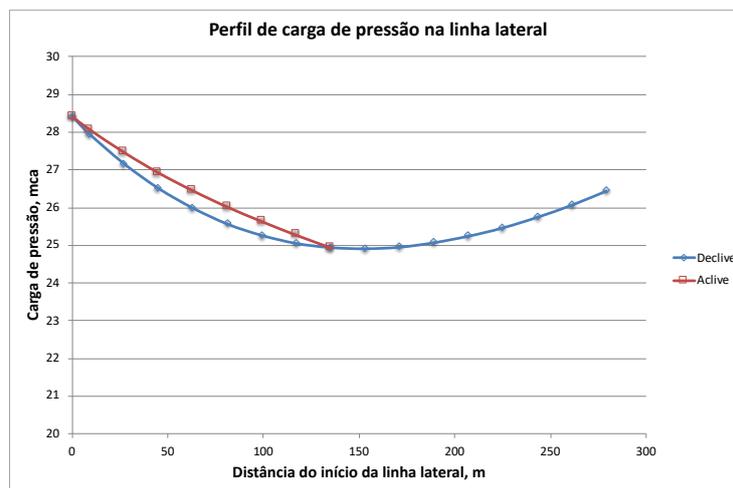


Figura 7. Perfis de carga de pressão para as linhas emparelhadas em aclave e em declive, tendo ambas $H_0 = 28,4\text{ m}$.

8.17.9 Dimensionamento da linha principal

Adotou-se o critério de velocidade máxima na tubulação de 2m s^{-1} para dimensionar a linha principal. Conforme o esquema operacional estabelecido, no qual as linhas laterais de mesma numeração operam simultaneamente (Figura 6), a vazão

Q_T não ultrapassa a posição 5 em aclave (ou a posição 6 em declive). A partir deste ponto, fluirá ou Q_A ou Q_D , dependendo da posição do conjunto operacional, sendo que Q_D é mais crítica por ter maior valor. Pode-se ter, então, um diâmetro maior até a posição 5 em aclave e outro menor a partir deste ponto, respeitando o critério de velocidade máxima de 2 m s^{-1} .

Para tubos de PVC PN60, tem-se DN 100 com diâmetro interno de 96mm e DN75 com diâmetro interno de 71,5 m. Com DN100, obteve-se a velocidade de $1,94\text{ m s}^{-1}$ para Q_T ($50,54\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$) e de $1,30\text{ m s}^{-1}$ para Q_D ($33,70\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$). Avaliou-se a possibilidade de adotar DN75 no trecho em que flui, no máximo, Q_D , porém a velocidade obtida foi de $2,33\text{ m s}^{-1}$, superior à permitida. Desta forma, toda a linha principal será de PVC PN60 e DN100 (com diâmetro interno de 96 mm).

8.17.10 Condição operacional crítica

Dentre as 10 posições percorridas pelo conjunto operacional durante o turno de irrigação, uma delas é a mais crítica, ou seja, irá requerer a maior altura manométrica. Para identificá-la, foram obtidas as perdas de carga unitárias (J) para três valores de vazão que podem ocorrer em trechos da linha principal, conforme a posição do conjunto operacional: (i) $Q_T = 50,54\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ com $J = 0,03212\text{ m m}^{-1}$, equivalente à vazão total, (ii) $Q_D = 33,70\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ com $J = 0,01541\text{ m m}^{-1}$; para a vazão da linha em declive, e (iii) $Q_A = 16,84\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ com $J = 0,00443\text{ m m}^{-1}$, referente à vazão da linha em aclave.

Neste caso, embora sejam 10 possíveis posições, pode-se reduzir a investigação a duas delas para identificar qual é a mais crítica, quais sejam:

(i) Posição 1 em aclave com posição 1 em declive

Quando operam simultaneamente a linha lateral 1 em aclave com a linha lateral 1 em declive, o objetivo é que se tenha na posição mais distante (1 em declive) a carga de pressão requerida na entrada da linha lateral ($H_0 = 28,4\text{ mca}$). Neste caso, a carga de pressão necessária na primeira saída da linha principal (H_1) é dada por:

$$H_1 = 28,4 + (9 \text{ espaçamentos} \times 18\text{m}) \times 0,05\text{m/m} + 0,01541\text{mca/m} \times (9 \times 18\text{m}) = \mathbf{39\text{ m}}$$

H_0 desnível perda de carga

(ii) Posição 5 em aclave com posição 5 em declive

Quando operam simultaneamente as linhas laterais de número 5 (em aclave e em declive), é requerido que se tenha $H_0 = 28,4\text{ mca}$ na entrada da linha lateral 5 em declive. Desta forma, H_1 deve ser:

$$H_1 = 28,4 + (5 \times 18\text{m}) \times 0,05\text{ m m}^{-1} + (4 \times 18\text{m} \times 0,03212\text{mca m}^{-1}) + (18\text{m} \times 0,01541\text{mca m}^{-1}) = 35,5\text{ m}$$

Portanto, a posição mais crítica é a 1, com $H_1 = \mathbf{39\text{ m}}$.

Na Tabela 5 são apresentadas as cargas de pressão em cada derivação da linha principal, conforme o esquema operacional detalhado na Figura 6. Por exemplo: quando estiverem operando as linhas laterais de número 3, a carga de pressão na entrada da linha lateral em aclave será de 36 m e a carga de pressão na entrada da linha lateral em declive será 30,2 m.

Caso o processo de identificação da condição operacional crítica tivesse sido equivocado, isto ficaria evidente ao analisar a Tabela 5, pois o menor valor de carga de pressão não estaria na posição definida. Neste caso, houve assertividade, pois a carga de pressão mínima ocorreu na entrada da linha lateral 1 em declive.

Observa-se, ainda, na Tabela 5, que todas as posições apresentam carga de pressão igual ou superior ao valor requerido ($H_0 = 28,4$ mca). Desta forma, nas derivações que apresentam valores superiores pode-se realizar o controle da carga de pressão para que se tenha H_0 , sendo que a forma mais simples e usual se dá por meio do uso de manômetro e fechamento parcial da válvula de linha. Desta forma, mesmo tendo um número par de posições operacionais e um esquema operacional em que as linhas laterais que operam simultaneamente se deslocam em sentidos opostos, tem-se a condição de linhas emparelhadas que apresentam o mesmo H_0 no trecho em aclave e em declive (7.17.8), posto que todas as posições terão H_0 assegurado pelo controle de carga de pressão.

Tabela 5. Carga de pressão, durante a operação, nas diferentes posições em que o conjunto operacional é deslocado na área irrigada. As linhas laterais em aclave e declive de mesma numeração (cor) operam simultaneamente.

Posição	Carga de pressão (m) na entrada da linha em ACLIVE	Posição	Carga de pressão (m) na entrada da linha em DECLIVE
10*	30,2	1	28,4
9	30,7	2	29,3
8	31,1	3	30,2
7	31,6	4	31,0
6	32,1	5	31,9
5	33,1	6	33,1
4	34,6	7	34,6
3	36,0	8	36,0
2	37,5	9	37,5
1	39,0	10	39,0

Posições com mesma numeração (cor) operam simultaneamente

8.17.11 Cálculo da altura manométrica e da potência do conjunto motobomba

A linha adutora corresponde à distância do conjunto motobomba até a posição 1 da linha principal (Figura 8), tendo comprimento de 69m, com desnível de 6,5m e perda de carga de 2,2mca, considerando que este trecho também será de PVC PN60 e DN100. A altura de sucção é de 2m e acrescenta-se 5% ao valor da altura manométrica para compensar as perdas localizadas em todo o sistema. Desta forma, considerando que a carga de pressão na posição 1 da linha principal é de 39 m, tem-se:

$$H_{\text{man}} = (39 + 6,5 + 2,2 + 2) \times 1,05 = 52,2 \text{ m} \quad (55)$$

O conjunto motobomba deverá fornecer 52,2 mca e uma vazão de 50,54 m³ h⁻¹. Considerando que o rendimento da bomba centrífuga selecionada é de 70% e que o do motor elétrico é de 88%, a potência do motor será de:

$$P = \frac{9,81 Q_T H_{\text{man}}}{0,735 \eta_m \eta_b} = \frac{9,81 \times 0,014 \times 52,2}{0,735 \times 0,88 \times 0,7} = 15,9 \text{ CV} \quad (56)$$

Adotando uma reserva de potência de 15%, a potência bruta será de 18,3 CV. Comercialmente, tem-se o motor de 20 CV.

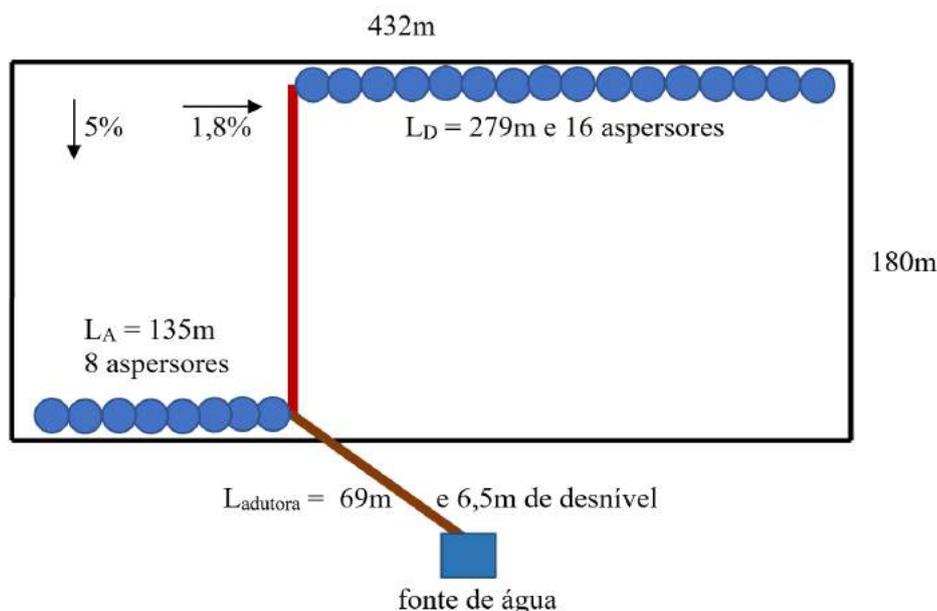


Figura 8. Croqui do projeto com linhas laterais emparelhadas, em active e em declive.

8.18 Considerações finais

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional são estratégicos para a agricultura irrigada brasileira, presentes em, aproximadamente, 25% dos estabelecimentos agrícolas que utilizam irrigação. Cada vez mais concentrados em pequenas áreas, são dimensionados por técnicos que atuam na Extensão Rural ou em revendas de produtos agrícolas em geral, quando não são definidos pelos próprios agricultores irrigantes. Há um grande potencial de melhoria destes sistemas de irrigação, em particular, dos projetos, sendo que o desenvolvimento de programas computacionais e de aplicativos para smartphones com fundamentação conceitual é um dos caminhos para viabilizar esta evolução. A crescente disponibilização de sensores e a difusão da internet no meio rural, abrem caminho para o monitoramento dos equipamentos e o manejo da irrigação, com baixo custo. Fomentar estas linhas de atuação e promover o treinamento dos técnicos e irrigantes serão etapas fundamentais para que a irrigação por aspersão convencional seja adequada desde o projeto até o manejo cotidiano.

Agradecimentos

Alguns itens apresentados neste capítulo foram desenvolvidos a partir de apontamentos de aula do Prof. Dr. Edmar José Scaloppi, uma referência na área de Irrigação e que muito contribuiu na minha formação acadêmica. Agradeço também ao Engº Agrº Caio Nascimento Fernandes, pela revisão do texto.

Referências

- ANDRINI, M.; SOUZA, C.; SAAD, J.C.C. Software slide para dimensionamento de linhas laterais em irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, v.1. p.18-24, 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v1n1p18-24.
- BABAJIMOPOULOS, C.; TERZIDIS, G. Accurate explicit equations for the determination of pipe diameters. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v.2, p.115-120, 2013. DOI: 115-120. 10.5923/j.ijhe.20130205.05.

- BROWN, G. The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance. **Proc. Environmental Water Resources History**, v.38, p.34-43, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/40650\(2003\)4](https://doi.org/10.1061/40650(2003)4). Acesso em: 30 abr. 2021.
- CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprinkling, **California Agricultural Experiment Station Bulletin 670**, University of California, Berkeley. 1942.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and Trickle Irrigation**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- LIU, C.P. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, n.124, p.951-954, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:9\(951\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:9(951)). Acesso em: 25 mar. 2021.
- MINHONI, R.T.A.; PEREIRA, F.F.S.; SILVA, T.B.G.; CASTRO, E.R.; SAAD, J.C.C. The performance of explicit formulas for determining the darcy-weisbach friction factor. **Engenharia Agrícola**, v.40, n.2, p.258-265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p258-265/2020>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- PIMENTA, B.D.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J.H.; BEN, L.H.B. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.5, p.301-307, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p301-307>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- ROCHA, H.S.; MARQUES, P.A.A.; CAMARGO, A.P.; FRIZZONE, J.A.; SARETTA, E. Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.143-149, 2017. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p143-149.
- SCALOPPI, E.J. Adjusted F factor for multiple outlet pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, p.169-174, 1988. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9437(1988)114:1(169).
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.19, n.3, p.554-567, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:1\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:1(91)). Acesso em: 23 mar. 2021.
- SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe flow problems. **Journal of Hydraulics Division**, n.102, p.657-664, 1976.
- VATANKHAH, A.R. Approximate Analytical Solutions for the Colebrook Equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, n.144, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001454.
- WU, P.; SARUWATARI, C.A.; GITLIN, H.M. Design of drip irrigation lateral length on uniform slopes. **Irrigation Science**, v.4, p.117-135, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00273380>. Acesso em: 23 mar. 2021.

CAPÍTULO 9

9 IRRIGAÇÃO COM DEFICIT

Luís Henrique Basso

Resumo

A ocorrência de *deficit* hídrico em plantas cultivadas afeta o crescimento e o desenvolvimento das culturas. Porém, em situações onde há a restrição quanto a disponibilidade de água para a irrigação, a necessidade de priorização de suprimento de água a um setor usuário que não seja a agricultura, e a existência de um elevado custo para a prática da irrigação, a aplicação de uma lâmina de água menor que a requerida em determinadas fases fenológicas das culturas, definida como irrigação com *deficit* ou deficitária, pode trazer menor custo operacional, pequena redução da produtividade, aumento da qualidade da produção, entre outros. Neste texto discute-se a irrigação com *deficit*, no tocante aos aspectos econômicos envolvidos; a importância da análise da irrigação sob o contexto da produtividade da água; a possibilidade do seu uso no Semiárido do Brasil, onde existem inúmeras áreas irrigadas; de modo geral, o conhecimento das respostas fisiológicas morfológicas e dos componentes de produção das culturas e, especificamente, de algumas culturas de interesse para o Brasil, com base nos resultados da pesquisa agrícola brasileira. Ao final, comentários e sugestões são apresentadas em relação ao caminho a seguir para que a prática da irrigação com *deficit* possa ser melhor conhecida, difundida e praticada na agricultura brasileira.

9.1 Introdução

A percepção que as pessoas têm sobre a falta de água e, especificamente, em relação àquela destinada à agricultura, está ligada geralmente aos ambientes semiáridos e áridos. No entanto, isso vem sendo mudado paulatinamente há alguns anos, em razão de alguns acontecimentos caracterizados pela redução temporária da disponibilidade de água em regiões onde existem elevada precipitação pluvial com boa distribuição ao longo do ano.

A crise hídrica de 2014 e 2015 na Região Sudeste e a de 2017, com maior impacto na Região Nordeste (principalmente Bahia, Ceará e Pernambuco) e no Distrito Federal são acontecimentos recentes. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), foi observada a redução nos valores mensais de chuvas desde 2012 na Região Nordeste e desde outubro de 2013 na Região Sudeste, em relação aos registros históricos. Além das menores taxas pluviométricas verificadas, a gestão da demanda e a garantia da oferta podem agravar ou atenuar a ocorrência de uma crise hídrica. A valorização do recurso hídrico como bem público finito e a conscientização da necessidade de um uso mais racional e sustentável da água são essenciais para que se tenha maior garantia da oferta hídrica para os usos múltiplos. Deve-se também apoiar e aprimorar técnicas de reúso da água; reduzir o desperdício pelos diferentes setores usuários; implementar ações de conservação de mananciais; e investir em infraestrutura de forma a garantir maior capacidade de reserva e de acesso à água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2015; 2018).

Em todos esses acontecimentos, houve restrição ao uso da água para irrigação e outras finalidades, e chamou a atenção da sociedade civil no tocante ao uso da água pela agricultura irrigada. Isso tem levado a acirrados debates sobre o uso da água

destinada à agricultura, notadamente a irrigada, chegando até ao questionamento sobre o porquê do uso desse recurso natural para esse fim, em detrimentos de outros setores da sociedade que também utilizam água, como residências, indústrias e prestadores de serviços (hospitais, clínicas e laboratórios de saúde humana e animal, hotéis, bares, restaurantes, padarias, etc.). Infelizmente, nem sempre a abordagem e a interpretação sobre a agricultura irrigada foram adequadas ou corretas.

Mas o que e como a agricultura irrigada pode contribuir para que haja uma maior eficácia e eficiência quanto ao uso da água? A irrigação com *deficit* pode ser um dos meios para que isso seja alcançado.

9.2 Irrigação com *deficit*: considerações sobre o seu uso

A possibilidade ou a viabilidade da irrigação com *deficit* tem sido avaliada há várias décadas, com diferentes relatos ou abordagens, os quais dependem da interação de diversos fatores. Deve-se ressaltar que a irrigação por *deficit* também pode ocorrer, indesejavelmente, por falhas no delineamento de um sistema de irrigação de uma cultura agrícola (a lâmina de água não atende a demanda hídrica da cultura) e, em uma maior escala, por falhas no planejamento e alocação de água em uma extensa área irrigada – perímetros irrigados (o volume de água entregue nas áreas a serem irrigadas é menor que o requerido).

9.3 Aspectos econômicos

Inicialmente, serão comentados superficialmente alguns aspectos econômicos sobre a prática da irrigação com *deficit*, relacionados às limitações de disponibilidade de água e de área agrícola.

A irrigação com *deficit* é a prática deliberada de irrigar uma cultura com um volume de água menor que o necessário, quando a disponibilidade desse recurso natural destinado a esse fim é limitada ou os custos para a prática da irrigação são elevados. O produtor deve admitir um possível estresse à cultura, o que pode trazer perdas à produção. Existem diferentes maneiras de manejar a irrigação deficitária, e estão relacionadas à redução da lâmina de irrigação, recarregando apenas parte da capacidade de armazenamento da água do solo na zona radicular da cultura. No caso da irrigação com *deficit* ser praticada com alta frequência ou o intervalo entre as irrigações for pequeno, a lâmina de água será aplicada em quantidades pequenas para evitar a redução brusca da umidade do solo ou permitir a diminuição da umidade do solo a um nível no qual a cultura sofrerá um estresse mais ou menos contínuo. Caso a irrigação com *deficit* seja praticada com baixa frequência ou em maiores intervalos entre as irrigações, a variação da umidade do solo ocorrerá em um intervalo bem maior, podendo haver um estresse à cultura. Ainda nesta última condição, caso haja uma aplicação de elevada lâmina de água seguida por um período sem irrigação, ou seja, ocorrendo apenas a extração de água do solo pela cultura, as plantas podem passar da elevada disponibilidade de água para um estresse em nível elevado, sendo que esse ciclo pode se repetir quando da realização da irrigação seguinte. As respostas das culturas a esses regimes de irrigação com *deficit* são diferentes (ENGLISH; NUSS, 1982; OEWIS; HACHUM, 2003). Na irrigação de superfície, a utilização de sulcos alternadamente ou mais separados é uma forma de implementar a irrigação deficitária (OEWIS; HACHUM, 2003). Para garantir o sucesso da irrigação deficitária, é necessário considerar a capacidade de retenção de água do solo. Em solos arenosos, as plantas podem rapidamente sofrer estresse hídrico sob irrigação deficitária, enquanto as plantas em solos profundos de textura fina, que possuem maior capacidade de retenção de água que solos arenosos, podem ter um maior tempo para se ajustar a menor

disponibilidade de água e assim ter menores prejuízos. Portanto, é provável que a obtenção de bons resultados com a irrigação deficitária seja maior em solos de textura fina (KIRDA, 2002).

Quanto ao desempenho e custo do sistema de irrigação, pode haver um menor custo de capital com a prática da irrigação com *deficit*, pois a menor vazão requerida pode possibilitar a utilização de tubos com menor diâmetro em sistemas que conduzem a água sob pressão. O requerimento de água e energia podem também ser menores e até ganhos podem ocorrer caso seja possível haver maiores intervalos entre irrigações - no caso do pivô central, pode não ser viável pelo tempo requerido para uma volta completa do sistema - ou pode ser viável a aplicação de água com menor uniformidade quanto ao umedecimento do solo - em sistemas de aspersão convencional (ENGLISH; NUSS, 1982).

No passado, as necessidades de irrigação das culturas não consideravam as limitações dos suprimentos de água disponível. O projeto de sistemas de irrigação não aborda as situações em que a disponibilidade de umidade do solo é a principal restrição à produtividade das culturas. Medidas agronômicas como práticas de preparo do solo, uso de cobertura morta e de antitranspirantes e irrigação com *deficit*, podem reduzir a demanda por água de irrigação. Nesta última, plantas expostas a certos níveis de estresse hídrico durante um determinado período de crescimento ou durante todo o seu crescimento, pode não ter redução significativa na produtividade. As práticas de irrigação deficitária diferem das práticas tradicionais de fornecimento de água. O técnico encarregado do manejo da irrigação precisa saber o nível de deficiência de transpiração permitido sem redução significativa no rendimento da cultura. O principal objetivo da irrigação deficitária é aumentar a eficiência do uso de água de uma cultura, eliminando irrigações que têm pouco impacto sobre a produtividade. A redução de rendimento resultante pode ser pequena em comparação com os benefícios obtidos por meio do desvio da água economizada para irrigar outras culturas, para as quais a água normalmente seria insuficiente sob as práticas tradicionais de irrigação. Antes de implementar um programa de irrigação deficitária, é necessário conhecer as respostas do rendimento da cultura ao estresse hídrico, seja durante estágios de crescimento definidos ou ao longo de toda o ciclo de produção. As variedades de alto rendimento são mais sensíveis ao estresse hídrico do que as variedades de baixo rendimento. As culturas ou variedades de culturas mais adequadas para irrigação deficitária são aquelas com um período de crescimento menor e tolerantes à seca. Sob práticas de irrigação deficitária, as práticas agronômicas podem exigir modificações, como a diminuição do estande de plantas, aplicação de menores doses de fertilizantes, adoção de datas de plantio flexíveis e seleção de variedades de estações mais curtas (KIRDA, 2002).

O uso de modelos de predição pode auxiliar na tomada de decisão quanto à alocação de água armazenada no subsolo ou na superfície, o chamado "banco de água", e pode ser importante ferramenta para a gestão da água em maior escala, inclusive para a prática da irrigação com *deficit*, quando deve-se decidir sobre qual espécie vegetal será cultivada, qual a área a ser cultivada e irrigada, e qual a lâmina de água a ser aplicada, o que está diretamente à quantidade e qualidade do produto agrícola (MARTIN *et al.*, 1989).

Uma análise econômica teórica desenvolvida por English (1990) mostra que, sob certas circunstâncias, o rendimento econômico máximo pode ser atingido com a irrigação com *deficit*, mas sob o contexto da engenharia de irrigação, é algo difícil de ser realizado, uma vez que o delineamento, planejamento ou manejo de um sistema de irrigação para tal prática tem que se basear em funções de produção, para que se saiba qual será a redução da produtividade da cultura com a redução de lâmina de irrigação.

Existem incertezas nas funções de produção, devido à variabilidade do clima, solo, incidência de pragas e doenças, etc., o que implica em um risco econômico. Do ponto do custo de oportunidade da água (que reflete o valor da água para o seu melhor uso possível, e que é zero quando não há limitação de água ou possibilidade de mais de um uso), pode haver uma redução da capacidade da bomba e do diâmetro do tubo para condução da água em sistema de irrigação pressurizado. Outro fato a considerar é que o preço do produto agrícola influenciará em quanto a lâmina de irrigação poderá ser reduzida, uma vez que poderá reduzir a produtividade. Maior o preço do produto, maior será a possibilidade da redução da lâmina de irrigação para que se obtenha lucro.

Os benefícios da irrigação com *deficit* podem não ser aparentes quando apenas os custos imediatos de aplicação de água (energia, mão de obra) são considerados. Outros custos fixos, os custos variáveis e o capital empregado no sistema de produção devem também ser avaliados, uma vez que pode haver redução de gastos com sementes, defensivos agrícolas, colheita, juros aplicados ao capital de giro, impostos, etc. Em um caso de estudo com a cultura do trigo irrigada por aspersão, o custo de produção reduziu significativamente com a prática da irrigação com *deficit*, sendo que a redução dos custos diretos da irrigação (energia, mão de obra e manutenção) não foram tão significantes como as reduções com os custos variáveis (semente, defensivos agrícolas, colheita) e fixos. Além disso, a produtividade média de trigo por volume de água aplicada foi substancialmente maior para as áreas sob irrigação com *deficit*, em comparação com as áreas com irrigação plena, ou seja, sem restrição hídrica. O retorno líquido em relação à terra e em relação à água aplicada sob irrigação com *deficit* foram, respectivamente, menor em 25% e maior em 14,5%, em relação às áreas com irrigação plena (ENGLISH *et al.*, 1990).

English e Raja (1996) mostraram que, para culturas anuais (trigo, algodão e milho), o uso ótimo da água, que é a obtenção de lucro ou produtividade máximos por volume de água ou unidade de área, é dependente da finalidade do seu uso, ou seja, maximizar o lucro ou a produção de alimento, e qual é o fator mais limitante, a água ou a área a ser cultivada. No caso da irrigação com *deficit*, deve-se adicionalmente conhecer quais os níveis de *deficit* hídrico nos quais o retorno líquido se equivale ao obtido quando da prática da irrigação plena. No entanto, existem incertezas relacionadas às funções de produção – principalmente, custo e preço do produto agrícola, o que implica em riscos.

Também podem haver condições pouco favoráveis ou pouco viáveis para a prática da irrigação com *deficit*: quando os custos relacionados ao insumo água forem baixos em relação a outros custos de produção de uma determinada cultura; quando métodos ou sistemas de irrigação forem capazes de proporcionar uma alta eficiência ou uniformidade de irrigação - o que pode levar a uma alta eficiência de uso de água; quando a chuva for responsável apenas por uma pequena porcentagem das necessidades totais de água - indicando que o uso da irrigação poderá acarretar em ganhos consideráveis de produtividade; quando a produtividade é alta, resultantes da otimização do uso de outros insumos e o preço de mercado do produto é alto; quando haver problemas com salinidade - por não haver a aplicação da lâmina de lixiviação; e quando a área irrigável for limitada e a disponibilidade de água não for limitante (HARGREAVES; SAMANI, 1984). Complementando essas considerações, o custo da energia, quando baixo, poderia também desfavorecer o emprego da irrigação com *deficit*.

Uma outra abordagem considera duas situações em relação à agricultura irrigada. Na primeira, a necessidade de água de qualquer cultura poderá ser atendida pela irrigação durante todo o período correspondente ao seu ciclo de produção,

enquanto que na segunda a disponibilidade de água não é suficiente para atender a necessidade de água de todas as culturas ou não é suficiente para atender a demanda durante todo o ciclo. Além disso, o delineamento do sistema na primeira situação, o da irrigação plena, poder ser mais simples que na segunda, o da irrigação com *deficit* (MANNOCCHI; MECARELLI, 1994).

9.4 Produtividade da água e sua relação com a irrigação com *deficit*

Em um sentido amplo, a produtividade da água pode ser estar relacionada ao valor ou ao benefício derivado do uso da água, sendo que a definição desse conceito pode variar em função do profissional envolvido quanto ao uso da água na agricultura. A obtenção de mais uma maior quantidade de biomassa (kg ou t) por unidade de água transpirada (mm) é um meio de expressar a produtividade quando a análise é realizada tendo a cultura como foco, mas em áreas extensas, como um perímetro irrigado ou uma bacia hidrográfica, a obtenção de um maior retorno econômico (R\$) por unidade de água utilizada para a irrigação (m³) ou mesmo para culturas dependentes de chuvas pode ser uma maneira melhor de expressar a produtividade da água. Vê-se então que a medida da produtividade da água depende da escala de interesse (MOLDEN *et al.*, 2003). É um conceito mais amplo que a eficiência de uso da água, definida pela relação entre a biomassa produzida por unidade de volume de água por unidade de área cultivada (kg m⁻³ ha⁻¹, t m⁻³ ha⁻¹).

A necessidade de prestar mais atenção à produtividade da água é claramente vista quando olhamos para as relações entre produção e fornecimento de água às plantas. Após um aumento inicial abrupto, a produtividade da cultura atinge o seu máximo com uma determinada quantidade de água fornecida às plantas e, em seguida, diminui ou permanece em um nível relativamente alto mesmo que haja o aumento do fornecimento de água. Em situações sem restrição hídrica, a água é sempre utilizada na tentativa de maximizar a produção, mas isso acarreta na sua utilização em uma forma menos produtiva. Se a água é mais escassa do que a terra (nesse caso, a área a ser irrigada), então a irrigação deficitária é uma estratégia lógica porque maximiza o recurso mais escasso, a terra. No entanto, é improvável que os usuários de água para irrigação usem as chamadas funções de produção como uma grande motivação para usar a água de forma mais produtiva. A aplicação de lâminas de água menores que os valores requeridos é uma estratégia que pode ser altamente benéfica se houver a perspectiva de chuvas que resultarão em grandes aumentos de produtividade, mas também é uma estratégia de alto risco se o fornecimento de água pela irrigação for menor que as expectativas (MOLDEN *et al.*, 2003).

A prática da irrigação deficitária, com base em funções de produção das culturas em função da água fornecida às plantas, pode aumentar a produtividade da água em áreas irrigadas. A produtividade da água de uma cultura mostra uma variação espacial e temporal significativa. O risco de irrigação deficitária pode ser minimizado por meio de uma programação de irrigação adequada para evitar o estresse hídrico durante as fases de crescimento e desenvolvimento da cultura mais sensível ao estresse hídrico, ou seja, implica no conhecimento apropriado do uso da água pela cultura e suas respostas aos deficits hídricos, incluindo a identificação de períodos críticos de crescimento da cultura e dos impactos econômicos das estratégias de redução da produtividade. Os índices de sensibilidade ao estresse hídrico têm uma implicação importante para o planejamento da irrigação, em particular para a irrigação com *deficit*. O monitoramento quanto ao momento e a quantidade de lâminas de irrigação tornam-se então condição importante para o sucesso da irrigação com *deficit* (OWEIS; HACHUM, 2003; ZHANG, 2003). Além disso, outras práticas agrícolas, como a data de semeadura,

que está relacionada com a necessidade de irrigação, e a irrigação suplementar com *deficit*, pode aumentar a produtividade da água. Neste caso, o conhecimento sobre a distribuição temporal das chuvas na área ou região também é primordial (OWEIS; HACHUM, 2003).

9.5 Irrigação com *deficit* no Semiárido do Brasil

No Semiárido do Brasil, região onde a quantidade de chuvas não é capaz de repor as perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera, as quais ocorrem pelo processo de evapotranspiração das culturas, a prática da irrigação é essencial para aumentar a possibilidade de êxito com a atividade agrícola. Nesta região, a fruticultura irrigada é uma das principais atividades econômicas, e é praticada em extensas áreas, dentro e fora de diversos perímetros irrigados implantados naquela região. Dessa forma, a viabilidade da irrigação com *deficit* pode parecer inviável nesta região. Os solos classificados como Latossolos e Argissolos formados sobre formação geológica de rochas cristalinas, representam a maior parte dos solos irrigados. No entanto, em outros tipos de solos no Semiárido, quando irrigados durante todo o ano e ao longo de vários anos, podem apresentar uma lenta redistribuição de água (drenagem) em suas camadas subsuperficiais, fazendo com que as mesmas armazenem água por longos períodos. Isso ocorre devido à presença de camadas adensadas do solo, originadas durante o processo de formação (gênese) do solo e à sua profundidade de pequena a média. Desse modo, quando do cultivo de espécies frutíferas com sistemas radiculares profundos e tolerância à seca, o uso de práticas de irrigação com *deficit* fazer com que essa água armazenada no perfil do solo seja aproveitada pelas plantas. Para isso, o conhecimento do tipo de solo e o monitoramento da água no solo e na planta são essenciais para auxiliar os produtores na adoção de práticas de irrigação com *deficit*. Dependendo da cultura, benefícios como a eficiência no uso da água devem aumentar em cada unidade de área irrigada, sem prejuízo significativo da produção da cultura (BASSOI, 2014). A utilização de estratégias de irrigação por *deficit* é vista como uma oportunidade, entre outras, para diminuir a lâmina de água aplicada às culturas, e aumentar a eficiência de uso de água (BASSOI *et al.*, 2017).

9.6 Estratégias de irrigação com *deficit*

As práticas de irrigação com *deficit* - ID (*deficit irrigation - DI*) difere das práticas tradicionais de aplicação de água em uma cultura agrícola. O técnico irrigante precisa saber o nível de deficiência de transpiração permitido sem redução significativa na produtividade da cultura. O principal objetivo da irrigação deficitária é aumentar a eficiência de uso de água de uma cultura, eliminando irrigações que têm pouco impacto sobre a produtividade. A redução de rendimento agrícola resultante pode ser pequena em comparação com os benefícios obtidos com a economia de água para irrigar outras culturas para as quais a água normalmente seria insuficiente sob a prática de irrigação plena, sem restrição hídrica (KIRDA, 2002).

A irrigação com *deficit* controlado - IDC (*Regulated Deficit Irrigation - RDI*), foi desenvolvida para melhorar o controle do vigor vegetativo em pomares de alta densidade, e otimizar o tamanho, a fecundidade e a qualidade dos frutos. O IDC é geralmente aplicado durante o período de crescimento lento dos frutos, quando o crescimento dos ramos é rápido. No entanto, também pode ser aplicado após a colheita em variedades de maturação precoce. Além disso, o IDC pode gerar uma economia considerável de água. Assim, é útil para reduzir o vigor vegetativo excessivo e também para minimizar a irrigação e a perda de nutrientes por lixiviação (GOODWIN; BOLAND, 2002).

A IDC e a irrigação com o secamento parcial da zona radicular - SPR (*partial rootzone drying - PRD*) são executados para limitar o vigor vegetativo e melhorar a eficiência do uso da água em plantas perenes, como as espécies frutíferas. Essa mudança no manejo da cultura, em comparação com a irrigação plena, que usa mais água, é uma característica comum tanto para a IDC quanto para o SPR. Essas duas estratégias de irrigação deficitária, entretanto, diferem pelo fato que na IDC, a aplicação de água é manipulada ao longo do tempo, enquanto que no SPR a água é manipulada no espaço (KRIEDEMANN; GOODWIN, 2003).

A IDC é a prática de usar irrigação para manter o estado da água na planta dentro dos limites previstos de *deficit* em relação ao potencial máximo de água na planta. O objetivo da IDC é controlar o crescimento e desenvolvimento reprodutivo, crescimento vegetativo e / ou melhorar a eficiência do uso da água. O reumedecimento (retorno à aplicação de água) sob a IDC pode ser determinado com base no monitoramento do potencial de água na planta, da umidade do solo ou com base nas estimativas de uso de água pela cultura com base na evapotranspiração. O SPR é a prática de usar irrigação para alternadamente umedecer e secar os dois lados do sistema radicular da planta, e manter simultaneamente o estado da água na planta elevado, controlar o crescimento vegetativo, melhorar a eficiência do uso da água, mantendo o crescimento e desenvolvimento reprodutivo. O reumedecimento no SPR pode ser determinado de modo idêntico a IDC (KRIEDEMANN; GOODWIN, 2003).

9.7 Respostas fisiológicas e morfológicas das plantas ao *deficit* hídrico

As plantas perdem água do seu interior para a atmosfera através da transpiração, e caso essa perda leve a uma condição de *deficit* hídrico, há a interferência em alguns processos fisiológicos, como o acúmulo de ácido abscísico e de solutos, e a redução da fotossíntese, condutância estomática, síntese proteica, síntese de parede celular e expansão celular. Este último é o mais facilmente afetado pela falta de água. A sensibilidade de determinado processo fisiológico aos deficits hídricos é, em grande parte, um reflexo da estratégia da planta em lidar com a faixa de variação na disponibilidade de água que ela experimenta em seu ambiente. No entanto, a falta de água impõe alguns limites (potencial hídrico) aos processos fisiológicos, os quais variam com as espécies vegetais (HOLBROOK, 2017).

As plantas podem alterar a sua morfologia em resposta à falta de água (estresse abiótico). Uma alteração muito comum e facilmente reconhecida na área agrícola é a alteração das formas das folhas, como diminuição da área, modificação da orientação em relação à incidência de raios solares, o enrolamento e o aumento da espessura da cutícula, para diminuir a transpiração. A relação entre as raízes e a parte aérea é influenciada pela absorção de água pelo sistema radicular e a realização da fotossíntese pelas folhas. O dossel vegetativo tende a crescer até que a absorção de água pelas raízes seja limitante a o seu crescimento. Por sua vez, o sistema radicular tende a crescer até que sua demanda por produtos da fotossíntese seja maior que o fornecimento pelas folhas. No caso de um estresse hídrico acontecer, essa relação é modificada, pois a água é fator limitante para a parte aérea, o que faz com que a expansão foliar seja reduzida antes que a fotossíntese seja afetada, diminuindo assim o consumo de fotossintetizados pelo dossel vegetativo. Consequentemente, uma maior quantidade destes é enviado às raízes para que o seu crescimento continue, mas o mesmo também é sensível à disponibilidade de água no solo (BLUMWALD; MITTLER, 2017).

9.8 Respostas de culturas ao *deficit* hídrico

São apresentados a seguir alguns resultados de pesquisas realizadas no Brasil com algumas culturas que apresentam extensa área irrigada, ou apresentam interesse agrônomo e econômico elevados para o agronegócio brasileiro, ou ainda apresentam potencial para a irrigação com *deficit*. Evidentemente, a quantidade de culturas apresentadas não se esgota aqui, nem as informações apresentadas sobre as culturas listadas, mas demonstram que o tema *deficit* hídrico em culturas agrícolas é objeto de estudo pela pesquisa agropecuária brasileira há décadas.

9.8.1 Arroz

A época de interrupção da aplicação de água interfere no período de irrigação do arroz, podendo influenciar a produtividade e o uso da água pela cultura. No Rio Grande do Sul, a irrigação intermitente e a antecipação da interrupção da aplicação de água nos estádios de grão pastoso e leitoso reduziram, em média, o período de irrigação em 32, 16 e 9 dias, respectivamente, com correspondentes economias de água de 27,9%; 17,6% e 11,6%, relativamente à manutenção da irrigação por inundação até a maturação dos grãos. Esses manejos da água não afetaram a produtividade do arroz, e promoveram incremento na eficiência de uso da água (SCIVITTARO *et al.*, 2010). Caso o *deficit* hídrico seja imposto no perfilhamento (fase vegetativa), o número de panículas pode ser afetado significativamente, mas se imposto após a iniciação da panícula (fase reprodutiva), pode não haver diferenças em relação ao fornecimento de água sem restrições (CONCENÇO *et al.*, 2018). Em outra abordagem com o arroz irrigado por inundação, também no Rio Grande do Sul, o potencial matricial da água no solo, ou a força com que o solo retém a água, não deve ser maior que 30 kPa (PARFITT *et al.*, 2017) para que não ocorra redução na produtividade, enquanto o valor de 40 kPa é reportado (SILVA *et al.*, 2018) para que não haja perda da qualidade do grão.

Em Goiás, a resposta da taxa de transpiração ao *deficit* hídrico nas fases vegetativa e reprodutiva de três cultivares modernos de arroz de terras altas (BRS Primavera, BRSMG Curinga e BRS Soberana) mostrou que o fator de depleção de água no solo p , ou seja, em quanto o armazenamento de água no solo pode ser reduzido, deve ser menor na fase vegetativa em relação à fase reprodutiva, o que indica uma maior tolerância à restrição de água nesta segunda fase (HEINEMANN *et al.*, 2011). Também em Goiás, o genótipos de arroz de terras altas que apresentaram maior tolerância à deficiência hídrica apresentaram produtividade negativamente relacionada com a temperatura da folha (maior a temperatura, pior o estado hídrico da planta, menor a produtividade), a esterilidade de espiguetas e o número de dias para a ocorrência de 50% da emissão das panículas, enquanto que a fertilidade de perfilhos, número de panículas por m², massa de 100 grãos e altura da planta foi maior quanto mais tolerante a seca for o genótipo (GUIMARÃES *et al.*, 2013). A evapotranspiração do arroz de terras altas na fase de emissão da panícula (R₃) é maior em relação à observada no início do enchimento do grão (R₅), quando submetido a períodos semelhantes de redução da irrigação em ambas as fases de crescimento. A produção de grãos de arroz é mais sensível à irrigação com *deficit* imposto desde o início do enchimento de grãos do que a partir da emissão da panícula (GUIMARÃES *et al.*, 2016).

9.8.2 Feijão

Em Goiás, à medida que o intervalo de irrigação do feijoeiro aumentou, 20 dias após a semeadura, em função da adoção de diferentes potenciais de água no solo para definição do momento de aplicação de água, houve uma redução do número de vagens por planta e de grãos por vagem e, conseqüentemente, da produção de feijão, sendo

que este decréscimo dependeu da demanda de evapotranspiração (STONE *et al.*, 1988). Também em Goiás, observou-se que durante 4 ciclos de cultivo do feijoeiro irrigado por aspersão convencional, com variação da lâmina de irrigação apenas entre 10 e 35 dias após a semeadura, a deficiência hídrica na fase vegetativa interferiu na produtividade (STONE; MOREIRA, 2001). Em Alagoas, comparativamente, a falta de água na fase vegetativa pode causar maiores perdas que na fase reprodutiva, entre floração e enchimento de grãos. O estresse causado pela deficiência hídrica também acarreta no aumento na temperatura foliar e da relação temperatura foliar / temperatura do ar, a redução da condutância estomática, da quantidade de água na folha e da fotossíntese (ENDRES *et al.*, 2010).

Em relação ao feijão caupi (gênero *Vigna*), no Ceará, quando o estresse hídrico foi aplicado em um único estágio fenológico, a sensibilidade à falta de água da cultura foi maior na fase de enchimento de grãos, seguida pela fase vegetativa e floração; quando o *deficit* de água foi aplicado em dois estágios fenológicos, a maior sensibilidade foi na fase vegetativa e enchimento de grãos (CORDEIRO *et al.*, 1998). No Piauí, o estresse hídrico aplicado durante a floração do feijão caupi causou redução da produção (número de vagens e número de sementes por vagem), independente do estresse hídrico ocorrido ou não na fase vegetativa (NASCIMENTO *et al.*, 2011). No mesmo estado, a redução da lâmina de irrigação no feijão caupi a partir de 30 dias após a semeadura, com base em 25, 50 e 75% da evapotranspiração de referência, mostrou que à medida que o *deficit* hídrico aumentou, houve menor conteúdo de água e de clorofila na folha, índice de área foliar e produtividade de grãos (BASTOS *et al.*, 2012).

9.8.3 Milho

Na cultura do milho, o período crítico da deficiência hídrica está compreendido entre a pré-floração ao início do enchimento de grãos, sendo que o número de grãos por espiga e o número de espigas por planta são os componentes da produção de grãos mais afetados pelo *deficit* hídrico (BERGAMASCHI *et al.*, 2004). A falta de água durante a polinização das plantas ocasiona a maior redução na produção do milho, sendo que lâminas de irrigação correspondentes a cerca de 60% da lâmina necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo podem aumentar a eficiência da irrigação (BERGAMASCHI *et al.*, 2006). No milho doce, a reposição de lâminas de água menor que a correspondente a 80% da evapotranspiração da cultura (ETc) limita o crescimento das plantas e a produção (BRITO *et al.*, 2013). No Piauí, o *deficit* hídrico no milho, correspondente a 50% da lâmina de água requerida, reduziu os números de grãos e de espigas por m² e o rendimento de grãos, e aumentou a eficiência do uso da água, além de revelar diferenças significativas no tocante as respostas entre os genótipos avaliados (SOUSA *et al.*, 2015).

9.8.4 Trigo

A deficiência hídrica no trigo, aplicada quando as plantas atingiram o estágio fenológico de quarta folha (40 dias após a semeadura-das), folha-bandeira (64 das), antese (abertura da flor - 82 das) e grão leitoso (98 das), mostrou que, quanto ao rendimento de grãos, o estágio mais sensível foi o da folha bandeira (18 dias antes da antese), seguido do estágio da antese, nos quais houve redução de, respectivamente, 94% e 50% da produtividade; que no estágio de grão leitoso os níveis de deficiência hídrica impostos não afetam significativamente o rendimento de grãos, em relação às plantas sem *deficit* hídrico; que independentemente do estágio de desenvolvimento, o nível de deficiência hídrica de até -2,0 MPa (potencial hídrico foliar) não afeta significativamente o rendimento de grãos; e que dos componentes de rendimento, o

número de grãos por espiga é o mais associado à redução da produtividade de grãos sob efeito da deficiência hídrica (RODRIGUES *et al.*, 1998). O *deficit* hídrico do solo fez com que houvesse uma redução do peso dos grãos de trigo quando ocorrido nos períodos de quarenta e um a sessenta dias anteriores à colheita. No período de quarenta e um a cinquenta dias anteriores à colheita, o rendimento de grãos também foi afetado negativamente. No entanto, o peso dos grãos foi influenciado positivamente pelo *deficit* hídrico do solo no período de um a dez dias anteriores à colheita (GUARIENTI *et al.*, 2005). A presença do *deficit* hídrico no início do período de florescimento de plantas de trigo ocasionou uma menor produção de fitomassa e de grãos, sendo que a diferença entre o desempenho de cultivares de trigo quanto a manutenção do potencial produtivo em condições de restrição de água pode ser avaliada pela recuperação do teor relativo de água nas folhas (SANTOS *et al.*, 2012b).

Sob a influência do estresse hídrico, a síntese de proteínas é inibida e a degradação de proteínas é acelerada, o que leva a um acúmulo de aminoácidos e aminas livres. Uma característica marcante de um distúrbio no metabolismo das proteínas é a mudança nas proporções dos aminoácidos e, frequentemente, um aumento elevado na concentração de prolina, diamina (putrescina) e poliaminas (espermidina e espermina). O aumento dos teores de prolina (aminoácido) e putrescina (diamina) em plantas de trigo é um indicativo da presença de estresse hídrico. O acúmulo desses compostos sob *deficit* hídrico tem sido associado com a tolerância das plantas a essa condição desfavorável, podendo representar um mecanismo regulador da perda de água, mediante aumento do potencial hídrico (FUMIS; PEDRAS, 2002).

9.8.5 Cana-de-açúcar

A deficiência hídrica durante a fase inicial de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar pode reduzir a condutância estomática, transpiração foliar, fotossíntese líquida e a eficiência de uso da água de produção. Algumas variedades de cana-de-açúcar podem apresentar maior sensibilidade estomática, não apresentando redução na fotossíntese líquida, indicando maior tolerância à falta de água. O estresse hídrico, seja moderado (40 a 60% da água disponível do solo) ou severo (0 a 20 % da água disponível no solo), provocou pouca redução na eficiência fotoquímica potencial da cana-de-açúcar (GONÇALVES *et al.*, 2010). Essa resposta da cana-de-açúcar à deficiência hídrica no início de seu desenvolvimento pode diferir entre cultivares, e as que apresentam maior largura da folha, número de folhas verdes, área foliar e densidade de estômatos podem ser consideradas tolerantes a um período prolongado de seca, podendo ser também mais produtivas (PINCELLI; SILVA, 2012). Considerando as fases de crescimento inicial, crescimento máximo e de acúmulo de sacarose no colmo, a susceptibilidade da cana-de-açúcar à restrição de água caracterizou-se pela redução de trocas gasosas (transpiração) nestas três fases, e de redução de matéria seca do colmo e do conteúdo de sólidos solúveis no caldo (MACHADO *et al.*, 2009).

Durante dois ciclos de produção de cana-de-açúcar, a redução da lâmina de água (55, 70, 85% da evapotranspiração da cultura - ETC) em três fases de seu desenvolvimento (brotação e perfilhamento, desenvolvimento e maturação) causou efeitos no seu crescimento (altura da planta) quando a restrição hídrica ocorreu na primeira fase de desenvolvimento. A área foliar foi prejudicada com a falta de água em todas as fases do seu desenvolvimento, em relação às plantas irrigadas com 100% da ETC. A qualidade tecnológica da cana-de-açúcar não foi alterada em função do *deficit* hídrico controlado nas diferentes fases de desenvolvimento. A produtividade da cana-de-açúcar foi maior utilizando-se *deficit* hídrico controlado de 70% da ETC na fase de brotação e perfilhamento de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. A fim de

se garantir maior eficiência do uso da água, recomenda-se a aplicação de uma lâmina correspondente a 85% da ETc nas fases de maior desenvolvimento ou maturação do ciclo da cultura (SIMÕES *et al.*, 2018).

9.8.6 Soja

A fixação biológica de nitrogênio é altamente afetada pelo estresse hídrico, e pode reduzir significativamente o número de nódulos. Além disso, maiores rendimentos são obtidos quando existe disponibilidade de água no solo (SANTOS *et al.*, 2012a). Diferentes genótipos de soja apresentaram comportamentos diferentes quanto a fotossíntese e a transpiração quando em condições de restrição hídrica (30% da capacidade de campo), em comparação com a condição de 70% da capacidade de campo (CEREZINI *et al.*, 2012).

No Rio Grande do Sul, a ocorrência de *deficit* hídrico na soja de baixo e alto vigor de semente, aos 1-10, 11-20, 21-30 e 31-40 dias após a emergência (dae), mostrou que as plantas oriundas de semente com maior vigor apresentaram maior altura de planta, diâmetro do caule, índice de colheita aparente e rendimento biológico aparente, em relação àquelas originadas de semente com menor vigor, proporcionando aumento de até 20% na produtividade. O *deficit* hídrico no período vegetativo da soja não afetou a altura de inserção da primeira vagem, número de nós da haste principal, número de vagens com uma e duas sementes e o rendimento de sementes por planta, mas reduziu a altura de planta, diâmetro do caule e o número de vagens com três sementes, tanto em plantas oriundas de sementes de alto como de baixo vigor. O *deficit* hídrico a partir de 20 dias após emergência provoca redução da qualidade fisiológica das sementes de soja, sendo mais severo em plantas provenientes de sementes de baixo vigor (TAVARES *et al.*, 2013).

Em São Paulo, a avaliação da aplicação de água correspondente a 50% da evapotranspiração (ETc) da soja durante o desenvolvimento vegetativo, entre floração e início da frutificação, entre a completa formação de vagens à formação da produção, na maturação e durante todo o ciclo, mostrou que o *deficit* hídrico causou redução na produtividade quando aplicadas no ciclo total da cultura, e que a menor disponibilidade de água apenas no enchimento de grãos representa o mesmo risco de perdas em relação à ocorrência no ciclo total. A altura total das plantas, número de vagens por planta, número de grãos por planta, a massa de grãos foi prejudicada, o que afetou diretamente na produtividade. Em relação à altura de inserção da primeira vagem, variável qualitativa que pode representar perdas no momento da colheita mecanizada, o *deficit* aplicado no estágio inicial foi prejudicial (GAVA *et al.*, 2015).

Os valores de condutância estomática, transpiração, taxa de fotossíntese da soja foram reduzidos significativamente com o aumento da tensão de água no solo, o que reduziu a produção de biomassa na parte aérea e nas raízes. As trocas gasosas (transpiração) nas plantas de soja também foram reduzidas com o aumento da tensão da água no solo, e as mais críticas foram observadas a partir de 25 kPa (SILVA *et al.*, 2020).

9.8.7 Algodão

No Piauí, foi observado que cultivares de algodão apresentaram tolerância ao *deficit* hídrico, não apresentando redução no seu desenvolvimento vegetativo e na produtividade quando o *deficit* foi aplicado na fase que antecede o florescimento, ou na fase compreendida entre o florescimento e o aparecimento das maçãs (BLANCO *et al.*, 2011).

Na Paraíba, o *deficit* hídrico restringiu o crescimento de dois cultivares de algodoeiro herbáceo (BRS 286 e BRS 336), com as fases mais sensíveis sendo as de crescimento inicial, de botão floral e de flor. O *deficit* de 14 dias, aplicados nas diferentes fases fenológicas, não influenciou a fotossíntese das plantas dos cultivares, mas alterou a condutâncias estomática e a transpiração das mesmas. As fases fenológicas de flor e de maçã foram as mais sensíveis ao *deficit* hídrico por apresentarem menor produção. Os tratamentos sem *deficit* em todo o ciclo e com *deficit* nas fases de crescimento inicial e de capulho, de ambos os cultivares de algodoeiro herbáceo, permitiram produtividade satisfatória em relação à média nacional (CORDÃO *et al.*, 2018).

No Rio Grande do Norte, a irrigação com *deficit* ocasionou declínio na produtividade de algodão em caroço, na percentagem e qualidade das fibras. Os cultivares FiberMax-993 e BRS-286 apresentaram as maiores produtividades e percentagem de fibras entre os cultivares avaliadas. Com a lâmina de irrigação de 40% da ETC os cultivares de fibra média (FiberMax-993, BRS-286 e BRS-335) apresentaram fibras curtas, e o cultivar de fibra longa (BRS-336) apresentou fibra média. De forma geral, a redução na qualidade da fibra não foi severa, estando dentro da faixa de qualidade aceitável pela indústria têxtil nacional, mesmo em condições de *deficit* hídrico. Em regiões com *deficit* hídrico o algodoeiro pode ser irrigado com lâmina de 70% da ETC, com produtividade média acima de 4.000 kg ha⁻¹ e boa qualidade da fibra (ZONTA *et al.*, 2015).

9.8.8 Uva

A irrigação com *deficit* é utilizada para controlar o vigor vegetativo da videira de vinho, e a composição da uva pode ser influenciada pela disponibilidade de água no solo.

A irrigação com *deficit* controlado - IDC (esgotamento até 60% da água total disponível no solo, iniciada no início da maturação dos frutos) e o secamento parcial do sistema radicular - SPR (14 dias de irrigação em um lado da videira, iniciada na frutificação) foram avaliados na videira 'Syrah' em Pernambuco. A quantidade de água aplicada foi ligeiramente menor no SPR, e a eficiência do uso da água foi um pouco maior que no IDC. A fenologia, medidas fisiológicas (fotossíntese líquida, transpiração, resistência estomática, potencial hídrico foliar), produção, número e peso dos cachos, sólidos solúveis totais e acidez total titulável não foram influenciados pelas estratégias de irrigação. Apenas a concentração de fenol foi maior com o SPR (BASSOI *et al.*, 2007).

Também em Pernambuco, as estratégias de irrigação com *deficit* - ID e irrigação com *deficit* controlado - IDC aplicadas na videira de vinho 'Syrah', durante a estação chuvosa e seca, alteraram alguns componentes quantitativos e qualitativos da uva, de maneiras distintas. As plantas de ambas as estratégias apresentaram diferenças quanto ao potencial hídrico foliar, indicando um estresse hídrico moderado. O número de cachos não foi afetado em ambos os ciclos pelas estratégias de irrigação deficitária, mas o peso de cachos por planta, peso médio do cacho e sólidos solúveis foram maiores na irrigação plena, sem restrição hídrica no ciclo do período "seco". As estratégias de irrigação com *deficit*, aplicadas após o pegamento do fruto, propiciaram uma economia na utilização da água (BASSOI *et al.*, 2015). A redução da lâmina de irrigação reduziu o potencial hídrico das folhas, influenciando na atividade fotossintética e causando o decréscimo de produção. Vinhos obtidos de uvas de plantas sob ID e IDC apresentaram maiores valores de teor alcoólico, ácidos málico e láctico, flavonóis, estilbenos, antocianinas, epicatequina, epicatequina galato e procianidina A2, podendo ser destinados à elaboração de vinhos de guarda, enquanto que vinhos de videiras com irrigação plena (IP) apresentaram os maiores valores de ácidos ascórbico e tartárico, menores teores

alcoólicos e compostos fenólicos em geral, podendo ser classificados como vinhos jovens (NASCIMENTO *et al.*, 2016). O IDC também favoreceu maior teores de Mg, Na e Mn, enquanto o P foi maior na IP. O Cd, Cr, Fe e Zn não foram influenciados pelas estratégias de irrigação. As estratégias de irrigação podem ser recomendadas para a obtenção de diferentes produtos, sendo a IP para vinhos jovens e de menor valor agregado, e a IDC e a ID para vinhos de guarda e de maior valor agregado (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

9.8.9 Mangueira

No Sudoeste da Bahia, o *deficit* total ou parcial de água no solo causou a redução da taxa de fotossíntese da mangueira 'Tommy Atkins'. A aplicação de irrigação com *deficit* controlado com 50% ETC durante a fase de maturação fisiológica dos frutos resultou em maior produtividade e melhor eficiência no uso da água, mas o IDC com 50% da ETC aplicado durante a fase de frutificação e a ausência de irrigação causaram redução significativa da produtividade (SANTOS *et al.*, 2014).

9.8.10 Citros

Na Bahia, o SPR foi realizado pela alternância periódica (7, 14 ou 21 dias) dos lados em que o microaspersor umedecia o sistema radicular das plantas de lima ácida 'Tahiti', e aplicava uma lâmina d'água equivalente a 50% da evapotranspiração da cultura (ETc). A comparação foi feita com a irrigação com *deficit* com 50% da ETC, tendo o microaspersor fixo em um dos lados das plantas, e ao tratamento 100% da ETC, com microaspersores de ambos os lados das plantas. Avaliou-se também o SPR (21 dias) com diminuição da irrigação em 25% da ETC. O SPR com 50% da ETC não difere da IDC com esse mesmo *deficit* e sem alternância de lados da irrigação em relação à produtividade, eficiência do uso da água, e diâmetro e peso dos frutos, independentemente do período de alternância dos lados de irrigação. O SPR com diminuição da irrigação em 25% da ETC não causou perdas em relação à irrigação sem *deficit* e sem localização da irrigação (SAMPAIO *et al.*, 2010).

A produtividade da laranja Pera-IAC, a qualidade do suco e a eficiência do uso da água foram avaliados durante cinco ciclos de produção em São Paulo. A irrigação melhorou a produção de frutos em três das cinco safras, mesmo aplicando apenas 25% da ETC. Os incrementos de rendimento da irrigação variaram de 15 a 64% quando comparados às plantas não irrigadas. A irrigação deficitária melhorou a qualidade dos frutos em comparação com as plantas irrigadas com 100% da ETC, uma vez que resultou em menor acidez e maior índice de maturação. Após cinco colheitas, a produção de frutos nos tratamentos irrigados aumentou 30,8% em relação às plantas não irrigadas. A eficiência do uso da água mostrou que a irrigação deficitária com 50% de ETC é uma estratégia interessante para aumentar a produtividade, qualidade e economia de água (SILVEIRA *et al.*, 2020).

9.8.11 Café

Em São Paulo, avaliação feita com base em 16 anos mostrou que o mês de maio é o mais importante quanto à redução da evapotranspiração do cafeeiro, o que afetou a sua produção. O mês de agosto deve ser o mês indicado para a suspensão da irrigação para a indução do florescimento no cafeeiro (ARRUDA; GRANDE, 2003).

Em Goiás, a irrigação por gotejamento durante todo o ano total e sem *deficit* hídrico no cafeeiro 'Mundo Novo' proporcionou a maior produtividade, com acréscimos de até 100% quando comparada às plantas não irrigadas, em três anos de avaliação. A

supressão da irrigação no período chuvoso provocou redução de até 32% na produção, devido à incidência de veranicos e má distribuição de chuvas (FERNANDES *et al.*, 2000).

No Espírito Santo, o cafeeiro 'Conilon' irrigado por aspersão fixa, com cinco anos de idade, foi avaliado quanto a interrupção da irrigação por três, cinco, sete e nove semanas, a partir do início de julho. As plantas não irrigadas, irrigadas durante todo o período e com irrigação interrompida durante nove semanas, apresentaram maiores percentuais de uniformidade da florada no estágio E₆. O estágio E₅ de desenvolvimento do botão floral se mostrou como melhor estágio para definir o momento para retornar a irrigação. O emprego de um período de supressão das irrigações não afetou o crescimento dos ramos que dão origem a ramos terciários, independente, independente da irrigação ou não (MARSETTI *et al.*, 2013).

No Cerrado, Minas Gerais, a concentração da florada foi avaliada em função do *deficit* hídrico aplicado nos meses de julho e agosto, nos cultivares de café Bourbon Amarelo J9 e Catuaí Vermelho IAC-144. O primeiro cultivar atingiu maior nível de *deficit* hídrico. As trocas gasosas (transpiração), a produtividade, a uniformidade de maturação de frutos e a classificação dos grãos beneficiados não foram afetados por níveis moderados de *deficit* hídrico. O percentual máximo de botões florais no estágio E₄, imediatamente antes da ocorrência da "chuva de florada", não é afetado pelos níveis de *deficit* impostos durante o inverno. O estado hídrico dos botões florais não se sobrepõe ao efeito da chuva de florada, que foi determinante para sua abertura (RONCHI *et al.*, 2015).

9.9 Considerações finais

A irrigação com *deficit* pode trazer benefícios em determinadas condições, as quais dependerão do delineamento do sistema de irrigação, de um manejo de irrigação adequado às condições locais de disponibilidade de água, solo, clima e espécie vegetal a ser cultivada. A irrigação com *deficit* requer mais controle sobre a quantidade e o tempo de aplicação de água do que a prática da irrigação plena, sem restrição hídrica. No entanto, informações são necessárias para orientar os agricultores sobre quando e quanto aplicar com a irrigação deficitária, a fim de reduzir o efeito do estresse hídrico na produtividade das culturas. A avaliação de genótipos de espécies vegetais de interesse agrônomo em relação ao *deficit* hídrico há muito tempo é realizada por instituições de pesquisa agrícola no Brasil. Com funções confiáveis de produção de água da cultura e conhecimento das fases da cultura que são sensíveis ao estresse hídrico, a irrigação com *deficit* ideal pode ser programada com uma redução de rendimento mínima em comparação com a irrigação plena e, portanto, o recurso água poderá ser utilizado de forma mais eficiente. Existem informações insuficientes a esse respeito no Brasil, o que aponta uma área de pesquisa a ser desenvolvida no nosso país.

Em muitos dos trabalhos realizados sobre *deficit* hídrico em uma cultura agrícola, muitas respostas das plantas são medidas, como a condutância ou resistência estomática (abertura dos estômatos), transpiração, temperatura e teor de clorofila da folha, potencial (força com que a água é retida) e conteúdo de água no tecido vegetal (folha). Em relação ao solo, as medidas do seu conteúdo de água (umidade do solo) e da força com que o solo a retém (potencial matricial de água no solo) são as mais frequentes. Uma mesma cultura, mas em locais diferentes, pode apresentar respostas de comportamentos fisiológico e morfológico similares ou diferentes, em função do genótipo ou cultivar, das condições de solo (profundidade; porcentagem de areia, silte e argila; capacidade de armazenamento de água; presença ou não de gradiente textural), clima (magnitude e distribuição das chuvas ao longo do período de cultivo; incidência de radiação solar que por sua vez afeta a temperatura, umidade e *deficit* de

saturação do ar e a evapotranspiração) e das práticas culturais adotadas (tipo e dose de fertilizante; época e espaçamento de plantio). Por isso, a experimentação local é importante para que se conheçam as respostas das plantas ao *deficit* hídrico onde serão cultivadas, as quais são expressas por medidas que servem como índices do momento de ocorrência e da intensidade do *deficit* hídrico e suas possíveis consequências, as quais podem auxiliar no manejo da irrigação com *deficit*. Assim, a instrumentação tem papel importante para que esse comportamento da água na planta e no solo possa ser seja conhecido e auxilie na definição de quando e quanto aplicar água, e quando diminuir ou interromper, ou ainda, em quanto diminuir a aplicação de água. Instrumentos de custo acessível aos produtores e técnicos, e de fácil operacionalidade, são necessários, além da difusão do conhecimento sobre o seu uso e capacitação de usuários para o seu correto manuseio e interpretação de suas medidas.

A irrigação com *deficit* é uma prática que vem sendo avaliada e difundida em vários países (África do Sul, Austrália, Estados Unidos, Índia, Israel, Turquia, etc.), sendo recomendada por agências governamentais. No Brasil, essa prática precisa ter uma maior abordagem nas universidades, em órgãos governamentais relacionados à gestão da água na agricultura e ao desenvolvimento de áreas irrigadas, e em empresas particulares de implantação de projetos e consultoria em irrigação. As incertezas (margem de erro) sobre o risco envolvido na prática da irrigação com *deficit* sobre a redução da produtividade agrícola e do lucro podem justificar a falta de interesse, mas não devem impedir a dedicação sobre o assunto, tornando-se assim um tema para futuras ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018**: informe anual. Brasília: ANA, 72p., 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos Hídricos no Brasil**. Informe 2014. Encarte Espacial sobre a Crise Hídrica. Brasília: ANA, 30p., 2015.
- ARRUDA, F.B.; GRANDE, M.A. Fator de resposta da produção do cafeeiro ao *deficit* hídrico em Campinas. **Bragantia**, v.62, n.1, p.139-145, 2003.
- BASSOI, L.H. Monitoring soil water in irrigated soils of the Brazilian semi-arid region: An opportunity to improve water use. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMMA, G.K. (Org.). **Application of Soil Physics in Environmental Analyses**, 1. Ed. Cham: Springer International Publishing, p.223-236, 2014.
- BASSOI, L.H.; CORREIA, J.S.; SANTOS, A.R.L.; SILVA, J.A.; COSTA, B.R.S. Deficit irrigation in grapevine cv. Syrah during two growing seasons in the Brazilian Semiarid. **Engenharia Agrícola**, v.35, p.430-441, 2015.
- BASSOI, L.H.; DANTAS, B.F.; LIMA FILHO, J.M.P.; LIMA, M.A.C.; LEÃO, P.C.S.; SILVA, D.J.; MAIA, J.L.T.; SOUZA, C.R.; SILVA, J.A.M.; RAMOS, M.M. Preliminary results of a long-term experiment about RDI and PRD irrigation strategies in wine grapes in São Francisco Valley, Brazil. **Acta Horticulturae**, p.275-282, 2007.
- BASSOI, L.H.; GONDIM, R.S.; RESENDE, R.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. A agricultura irrigada no Nordeste do Brasil: estado da arte, desafios e oportunidades. In: RODRIGUES, L.N.; DOMINGUES, F.D. (Org.). Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Fortaleza: **Inovagri**, p.131-166, 2017.
- BASTOS, E.A.; RAMOS, H.M.M.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; NASCIMENTO, F.N.; CARDOSO, M.J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob *deficit* hídrico. **Water Resources and Irrigation Management**, v.1, n.1, p.31-37, 2012.

- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J.I.; MÜLLER, A.G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A.O.; RADIN, B.; BIANCHI, C.A.M.; PEREIRA, P.G. *Deficit* hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.243-249, 2006.
- BLANCO, F.F.; RIBEIRO, V.Q.; RIBEIRO, J.L.; NOGUEIRA, C.C.P.; VELOSO, M.E.C. Crescimento e produção de cultivares de algodão sob irrigação com *deficit*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 8, 2011, São Paulo. **Anais**. Brasília: ABRAPA, 2011.
- BLUMWALD, E.; MITTLER, R. Estresses abióticos. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. (Ed.). **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed. p.731-761, 2017.
- BRITO, M.E.B.; ARAÚJO FILHO, G.D.; WANDERLEY, J.A.C.; MELO, A.S.; COSTA, F.B.; FERREIRA, M.G.P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v.29, n.5, p.1244-1254, 2013.
- CEREZINI, P.; FAGOTTI, D.S.L.; KUWANO, B.H.; SOUZA, D.I.; PIPOLO, V.C.; PIPOLO, A.E.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A. Aspectos nutricionais e fisiológicos em genótipos de soja com diferentes níveis de tolerância à restrição hídrica. In: FERTBIO 2012, Maceio. Viçosa: SBCS, 2012.
- CONCENÇO, G.; PARFITT, J.M.B.; MOISINHO, I.S.; BUENO, M.V.; SILVA, J.T.; CONCENÇO, S.E. Rice yield components under water stress imposed at different growth stages. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.3, p. 290-297, 2018.
- CORDÃO, M.A.; ARAÚJO, W.P.; PEREIRA, J.R.; ZONTA, J.H.; LIMA, R.P.; FERREIRA, F.N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob *deficit* hídrico aplicado em fases fenológicas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.3, p.313-321, 2018.
- CORDEIRO, L.G.; BEZERRA, F.M.L.; SANTOS, J.J.A.; MIRANDA, E.P. Fator de sensibilidade ao *deficit* hídrico da cultura do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.2, p.153-157, 1998.
- ENDRES, L.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; MARROQUIM, P.M.G.; SANTOS, C.M.; BRITO, J.E.D. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p.11-16, 2010.
- ENGLISH, M. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p. 399-412, 1990.
- ENGLISH, M.; JAMES, L.; CHEN, C.F. Deficit Irrigation. II: Observations. In: Columbia Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p.413-426, 1990.
- ENGLISH, M.; RAJA, S.N. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.32, p.1-14, 1996.
- ENGLISH, M.J.; NUSS, G.S. Designing for deficit irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.108, n.2, p.91-106, 1982.
- FERNANDES, A.S.L.T.; SANTINATO, R.; LESSI, R.; YAMADA, A.; SILVA, V.A. Deficiência hídrica e uso de granulados em lavoura cafeeira irrigada por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.376-381, 2000.
- FUMIS, T.F.; PEDRAS, J.F. Variação nos níveis de prolina, diamina e poliaminas em cultivares de trigo submetidas a deficits hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.4, p.449-453, 2002.
- GAVA, R.; FRIZZONE, J.A.; SNYDER, R.L.; JOSE, J.V.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.9, n.6, p.349-359, 2015.

- GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.
- GOODWIN, I.; BOLAND, A.M. Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.). **Water Reports, Deficit irrigation practices**. Rome: FAO. n.22, p.67-78, 2002.
- GUARIENTI, E.M.; CIACCO, C.F.; CUNHA, G.R.; DEL DUCA, L.J.A.; CAMARGO, C.M.O. Efeitos da precipitação pluvial, da umidade relativa do ar e de excesso e *deficit* hídrico do solo no peso do hectolitro, no peso de mil grãos e no rendimento de grãos de trigo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.3, p.412-418, 2005.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; RANGEL, P.H.N.; SILVA, A.C.L. Tolerance of upland rice genotypes to water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.8, p.805-810, 2013.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; SILVA, A.C.L. Evapotranspiration and grain yield of upland rice as affected by water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.5, p.441-446, 2016.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Economic considerations of deficit irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage**, v.110, n.4, p.343-358, 1984.
- HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; FAGERIA, N.K. Transpiration rate response to water deficit during vegetative and reproductive phases of upland rice cultivars. **Scientia Agricola**, v.68, n.1, p.24-30, 2011.
- HOLBROOK, N.M. Água e células vegetais. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. (Ed.). **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, p.83-98, 2017.
- KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed). **Water Reports. Deficit irrigation practices**. Rome: FAO, n.22, p.3-10, 2002.
- KRIEDEMANN, P.E.; GOODWIN, I. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. An overview of principles and applications. Canberra: **Land & Water Australia**, 102p., 2003.
- MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao *deficit* hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.
- MANNOCCHI, F.; MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.120, n.3, p.484-503, 1994.
- MARSETTI, M.M.S.; BONOMO, R.; PARTELLI, F.L.; SARAIVA, G.S. *Deficit* hídrico e fatores climáticos na uniformidade da florada do cafeeiro Conilon irrigado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.7, n.6, p.371-380, 2013.
- MARTIN, D.; BROCKLIN, J.; WIMES, G. Operating Rules for Deficit Irrigation Management. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.4, p.1207-1215, 1989.
- MOLDEN, D.; MURRAY-RUST, H.; SAKTHIVADIVEL, R.; MAKIN, I. A water-productivity framework for understanding and action. In: JACOB, W; KIJNE, R.B.; DAVID, M. (Ed). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, p.1-18, 2003.
- NASCIMENTO, R.L.; SILVA, J.A.B.; BASSOI, L.H.; PEREIRA, G.E.; COSTA, B.R.S.; OLIVEIRA, V.S. Trocas gasosas e composição físico-química de vinhos em função de estratégias de irrigação. **Irriga**, v.especial, p.205-217, 2016.

NASCIMENTO, S.P.; BASTOS, E.A.; ARAÚJO, E.C.E.; FREIRE FILHO, F.R.; SILVA, E.M. Tolerância ao *deficit* hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.853-860, 2011.

OLIVEIRA, V.S.; PEREIRA, G.E.; LIMA, A.M.M.; SALVIANO, A.M.; NASCIMENTO, R.L.; BASSOI, L.H. Influence of irrigation strategies on the physicochemical properties of 'Syrah' wine produced in São Francisco Valley. **Irriga**, v.23, p.818-834, 2018.

OWEIS, T.Y.; HACHUM, A.Y. Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. In: JACOB, W.; KIJNE, R.B.; DAVID, M. (Ed). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, p.179-189, 2003.

PARFITT, J.M.B.; CONCENÇO, G.; DOWNING, K.; LARUE, J.; SILVA, J.T. Rice growth under water stress levels imposed at distinct developmental stages. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, n.3, p.587-596, 2017.

PINCELLI, R.P.; SILVA, M.A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v.28, n.4, p. 546-556, 2012.

RODRIGUES, O.; LHAMBY, J.C.B.; DIDONEP, A.D.; MARCHESE, J.A.; SCIPIONI, C. Efeito da deficiência hídrica na produção de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.6, p.839.846, 1998.

RONCHI, C.P.; ARAÚJO, F.C.; ALMEIDA, W.L.; SILVA, M.A.A.; MAGALHÃES, C.E.O.; OLIVEIRA, L.B.; DRUMOND, L.C.D. Respostas ecofisiológicas de cafeeiros submetidos ao *deficit* hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.50, n.1, p.24-32, 2015.

SAMPAIO, A.H.R.; COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; DANIEL, R.; MACHADO, V.V.; CARVALHO, G.C.; SANTANA JUNIOR, E.B. *Deficit* hídrico e secamento parcial do sistema radicular em pomar de lima ácida. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.45, n.10, p.1141-1148, 2010.

SANTOS, D.; GUIMARÃES, V.F.; KLEIN, J.; FIOREZE, S.L.; MACEDO JÚNIOR, E.K. Cultivares de trigo submetidas a *deficit* hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.836-842, 2012.

SANTOS, E.L.; CATTELAN, A.J.; PRETE, C.E.C.; NEUMAIER, N.; OLIVEIRA, M.C.N.; FARIA, J.R.B.; CARVALHO, J.F.C.; NEPOMUCENO, A.L. Water stress affecting nodulation, oil, protein and grain yield of soybean cultivars. **Global Science and Technology**, v.5, n.2, p.109-120, 2012.

SANTOS, M.R.; MARTINEZ, M.A.; DONATO, S.L.R.; COELHO, E.F. 'Tommy Atkins' mango yield and photosynthesis under water deficit in semiarid region of Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.9, p.899-907, 2014.

SCIVITTARO, W.; STEINMETZ, S.; SEVERO, A.C.M. **Demanda hídrica e eficiência de uso da água pelo arroz**: influência do período de supressão da irrigação. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, n.132, 21p., 2010.

SILVA, J.A.; SANTOS, P.A.B.; CARVALHO, L.G.; MOURA, E.G.; ANDRADE, F.R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.50, e58854, 2020.

SILVA, J.T.; CAMPOS, A.D.S.; TIMM, P.A.; BUENO, M.V.; PARFITT, J.M.B.; CONCENÇO, G. Soil water tension and rice grain quality. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, n.2, p.502-509, 2018.

SILVEIRA, L.K.; PAVÃO, G.C.; SANTOS DIAS, C.T.; QUAGGIO, J.A.; PIRES, R.C.M. Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: A long-term study on Pêra-IAC sweet orange. **Agricultural Water Management**, v.231, p.106019, 2020.

- SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; GUIMARÃES, M.J.M; OLIVEIRA, A.R.; PINHEIRO, M.P.M.A. Sugarcane crops with controlled water deficit in the Sub-middle São Francisco Valley, Brazil. **Revista Caatinga**, v.31, n.4, p.963-971, 2018.
- SOUSA, R.S.; BASTOS, E.A.; CARDOSO, M.J.; RIBEIRO, V.Q.; BRITO, R.R. Desempenho produtivo de genótipos de milho sob *deficit* hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.1, p.49-60, 2015.
- STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p.473-481, 2001.
- STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVA, S.C. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro I. Produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.2, p.161-167, 1988.
- TAVARES, L.C.; RUFINO, C.A.; TUNES, L.M.; BARROS, C.S.A. Rendimento e qualidade de sementes de soja de alto e baixo vigor submetidas ao *deficit* hídrico. **Interciência**, n.1, v.38, p.73-80, 2013.
- ZHANG, H. Improving water productivity through deficit irrigation: Examples from Syria, the North China Plain and Oregon, USA. In: JACOB, W.; KIJNE, R.B.; DAVID, MOLDEN (Ed). **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement**. Colombo: International Water Management Institute, p.301-310, 2003.
- ZONTA, J.H.; BEZERRA, J.R.C.; SOFIATTI, V.; FARIAS, F.J.C.; CARVALHO, L.P. Efeito da irrigação no rendimento e qualidade de fibras em cultivares de algodoeiro herbáceo. **Revista Caatinga**, n.4, v.28, p.43-52, 2015.

CAPÍTULO 10

10 IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR SULCOS

Edmar José Scaloppi

Resumo

A irrigação por sulcos representa um dos sistemas mais econômicos e, provavelmente, um dos mais utilizados no mundo, apesar de pouco difundido no Brasil. Apresenta uma lista considerável de características vantajosas e admite-se que a reduzida participação na área irrigada nacional seja determinada por desconhecimento de suas potencialidades, a inexistência de divulgação por não envolver interesses comerciais e a consequente marginalização em cursos de graduação, pós-graduação e aperfeiçoamento. A reduzida proporção das áreas irrigadas relativamente às áreas cultivadas no país revela que, apesar dos reconhecidos benefícios, a irrigação constitui uma alternativa onerosa, restritiva à maioria dos agricultores. A presente proposta foi desenvolvida basicamente para redução de custos fixos e variáveis, em função de rigoroso protocolo tecnológico, econômico, ambiental e social, procurando inserir um maior número de agricultores aos reconhecidos benefícios da agricultura irrigada e envolver os interessados no dimensionamento, instalação e operação do sistema e no manejo da irrigação, tornando-os competentes gestores em seus projetos. O processo de aplicação de água foi intencionalmente simplificado, resumindo-se apenas nas fases de avanço e recesso da água na superfície de escoamento. O dimensionamento procura satisfazer 1/3 do comprimento das parcelas com alguma percolação controlada, 1/3 com uma quantidade infiltrada próxima à recomendada, e 1/3 com um *deficit* hídrico intencional, na expectativa de aumentar a eficiência de uso de água, além de possibilitar um maior aproveitamento das chuvas e eliminar o deflúvio superficial no final dos sulcos. Deve-se destacar que a percolação controlada não representa uma perda efetiva de água, pois permanecerá na bacia hidrográfica com melhor qualidade para eventual reutilização. Com a redução da velocidade de avanço ao longo do comprimento, as linhas de plantio podem ser deslocadas, coincidindo com a seção de escoamento dos sulcos. Essa localização da aplicação de água junto ao sistema radicular das plantas contribui para aumentar a eficiência de uso de água pela cultura, além de favorecer a produção em condições de salinidade, reduzindo a concentração de sais solúveis no ambiente radicular. Além de incorporar a prática de quimigação de baixo custo, é o único sistema que permite a aplicação de fertilizantes orgânicos em sistemas de produção que não utilizam fertilizantes minerais.

10.1 Introdução

A irrigação por sulcos integra os sistemas de irrigação por superfície, nos quais, a distribuição da água na área irrigada resulta da energia associada à gravidade, em pequenos canais condutores, em geral, executados mecanicamente, na superfície do solo. Representa um dos mais antigos e difundidos sistemas, prevalecendo em grande parte das áreas irrigadas do mundo. O prêmio anual da *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE, 2020) foi conferido ao pesquisador László Hayde (*Institute for Water Education, The Netherlands*) por promover a aceitação e o uso eficiente da irrigação por superfície. A premiação reconhece a predominância de 75% desses sistemas nas áreas irrigadas mundiais, em torno de 180 milhões de hectares. Nos Estados Unidos, respondem por 9,4 milhões de hectares (37% da área irrigada)

segundo o United States Geological Survey (2015) em culturas anuais extensivas (algodão, milho, soja, etc.) frutíferas e olerícolas. A Figura 1 ilustra uma irrigação por sulcos em uma cultura de algodoeiro nos Estados Unidos. Por outro lado, o Atlas da Irrigação publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) registra apenas 1,54 milhões de hectares (22% da área irrigada nacional) para a irrigação por inundação na cultura do arroz, sem mencionar a área irrigada por sulcos. Com base nas informações relativas a outros sistemas, acredita-se aproximar de 200.000 ha, apenas 3% da área irrigada nacional. A existência de 11,2 milhões de hectares com grande potencial de recursos hídricos, solos e topografias favoráveis à irrigação pode criar uma expectativa favorável ao incremento das áreas irrigadas por sulcos no país, desde que algumas ações sejam devidamente incentivadas.



Figura 1. Irrigação por sulcos em uma cultura de algodoeiro nos Estados Unidos.

Evidentemente, existem razões, justificáveis ou não, para explicar a reduzida participação da irrigação por superfície na área irrigada nacional. Na previsão da agricultura irrigada para 2030 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017) foi antecipado que “métodos não mecanizados de irrigação, como sulcos e inundação, devem prosseguir numa tendência de retração, desativados ou substituídos por outros métodos”, manifestando o descrédito que a instituição demonstra nesses sistemas, motivando sua exclusão como alternativa de irrigação, reforçando ainda mais a marginalização predominante na divulgação, no ensino e na pesquisa. Aparentemente, ignorou-se que em vários países, a irrigação por sulcos tem merecido notáveis avanços tecnológicos (KOECH *et al.*, 2014; UDDIN *et al.*, 2018), equiparando-a aos referidos métodos mecanizados, uma realidade que, infelizmente, não tem sido observada em nossas condições. Não se deve ignorar, entretanto, que a contribuição de muitos profissionais para o incremento da destacada irrigação mecanizada no país tem sido apenas repassar o contato dos interessados às revendedoras das empresas fabricantes, algumas multinacionais. Ao contrário, a irrigação por superfície requer um envolvimento efetivo do profissional, habilitando-o ao preenchimento cabal da Anotação de Responsabilidade Técnica junto ao CREA, valorizando suas atividades curriculares. Além disso, caso exista um objetivo social na agricultura irrigada, seria oportuno expressar o potencial da irrigação não apenas no acréscimo na área irrigada, mas também, no número de agricultores potencialmente beneficiados por este acréscimo.

Deve-se destacar que o sistema de irrigação de baixo custo por sulcos, apresentado neste capítulo, está proposto sob quatro protocolos: tecnológico, econômico, ambiental e social. Seria desejável que os argumentos contrários ao sistema

fossem sempre apresentados nesse contexto, permitindo assim, esclarecimentos mais motivadores aos interessados. Esses protocolos fundamentam-se em adotar procedimentos dimensionais e operacionais com o objetivo de proporcionar um elevado desempenho da irrigação, com redução de custos fixos e variáveis, preservando a qualidade do solo, da água e da paisagem, procurando inserir agricultores descapitalizados aos benefícios da agricultura irrigada, em especial, à melhoria da qualidade de vida, tornando-os competentes gestores em seus projetos, à semelhança do comportamento dos irrigantes de *San Joaquin Valley*, na Califórnia, EUA. Para tanto, há um incentivo para integrá-los no dimensionamento, instalação e operação dos sistemas, bem como no manejo das irrigações. Em 2013, os projetos de irrigação de baixo custo, incluindo aspersão e gotejamento, foram incorporados ao acervo de Tecnologias Sociais da Fundação Banco do Brasil. O elevado interesse neste e em outros sistemas alternativos de baixo custo foi revelado em uma reportagem exibida pela TV Unesp (2015) quando, em novembro de 2020, ultrapassou 3 milhões de visualizações, com média superior a 1.430 visualizações diárias.

Principais características: (i) Em geral, revela um custo total anual reduzido (soma de custos fixos e variáveis) razão principal de sua predominância nas áreas irrigadas em várias regiões do mundo. Talvez, o controle da superfície freática através de drenos (SKAGGS *et al.*, 1972) possa oferecer menor custo, porém, requer condições naturais raramente encontradas em áreas agrícolas. Solos argilosos, com reduzida razão de infiltração, e topografias relativamente planas, permitem maiores comprimentos de sulcos, contribuindo para reduzir proporcionalmente os custos do sistema de irrigação, (ii) Dispensa a pressurização da água, ou o próprio bombeamento, caso a cota do manancial esteja um pouco acima daquela da área a ser irrigada. Assumindo uma carga manométrica requerida em sistemas por aspersão entre 5 a 10 vezes superior à requerida por sulcos, é fácil demonstrar que, para resultar no mesmo consumo energético, a eficiência da irrigação no sistema por sulcos deveria variar entre 8 e 16%, tornando o projeto técnica e ambientalmente inviável, (iii) Aplicável à maioria das culturas anuais ou perenes, independente da altura das plantas, desde que tenham sido instaladas com a previsão de serem irrigadas por sulcos, ou seja, deve haver um pequeno desnível, em geral, entre 0,5 e 1%, relativamente uniforme na direção das linhas de plantio. Em condições de solos com reduzida razão de infiltração e comprimentos inferiores a cerca de 50m, pode-se adotar a execução em nível, sendo o gradiente hidráulico responsável pelo avanço da frente líquida na superfície de escoamento, (iv) Em culturas cujas plantas de interesse se apresentam razoavelmente espaçadas, como os pomares em geral, cafezais, videiras, bananeiras, coqueiros, maracujazeiros, meloeiros, etc., os sulcos devem estar próximos às raízes das plantas cultivadas. Nesses casos, o sistema adquire uma característica vantajosa de irrigação localizada em faixas, com grande economia de água, quando comparado aos sistemas por aspersão e mesmo microaspersão, (v) A possibilidade de irrigação em sulcos alternados e o plantio coincidente com a seção de escoamento, após a redução da velocidade de avanço, reduzem a quantidade de água aplicada sem prejudicar significativamente a quantidade e qualidade da produção, resultando em acréscimos na eficiência de uso de água (produção por quantidade de água aplicada), (vi) A recomendação intencional de irrigação deficitária (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION 2002; OUDA *et al.*, 2020) nas porções finais dos sulcos favorece a eficiência de uso de água pela cultura, além de eliminar o deflúvio superficial e disponibilizar espaço para o armazenamento de água de chuvas que podem ocorrer durante o ciclo fenológico, reduzindo a deficiência hídrica estacional, (vii) Pequena dependência à qualidade da água, podendo utilizar águas superficiais poluídas ou residuárias, sem tratamento ou filtragem. Em geral, a qualidade da produção não é comprometida, mesmo para o consumo *in natura* (sem processamento) uma vez que

não ocorre contato da água com a parte aérea das plantas. Águas com elevada quantidade de material orgânico beneficiam as características físicas, químicas e microbiológicas do solo e favorecem a nutrição vegetal, com economia de fertilizantes minerais e orgânicos. Entretanto, a presença de poluentes prejudiciais ao solo e às plantas cultivadas, ou contaminantes dificilmente degradáveis, deve ser evitada, (viii) Dispensa equipamentos especiais ou mão de obra especializada no processo de aplicação de água, (ix) Possibilita a aplicação de agroquímicos (fertilizantes, corretivos e outros agroquímicos de solo) com facilidade na água de irrigação, empregando equipamento de baixo custo e com reduzida possibilidade de obstrução. A exigência de solubilidade é menor que em outros sistemas e, portanto, os fertilizantes são mais baratos. Mesmo em suspensão, podem ser aplicados, com sucesso, na água de irrigação. A possibilidade exclusiva de aplicação de fertilizantes orgânicos deve ser valorizada em cultivos praticados na agricultura orgânica, (x) Não interfere nos tratamentos fitossanitários aplicados na parte aérea da cultura. Portanto, não há a possibilidade de lixiviação de agroquímicos, como ocorre na irrigação por aspersão, (xi) Pouco material manufaturado, reduzindo o consumo de matéria prima e energia na fabricação e o eventual descarte ao meio ambiente ao final do período de vida útil da tubulação utilizada, (xii) Reduzida perda de água por evaporação pela exposição de uma pequena superfície de molhamento e menor frequência das irrigações. Esta redução é evidenciada na expressão do coeficiente de cultura – $K_c = K_{cb} \times K_s + K_e$, empregada no cálculo da evapotranspiração, onde K_e , coeficiente de evaporação, atribuído ao molhamento da superfície, sempre apresenta um valor inferior aos sistemas de irrigação pressurizados que incorporam a água através da superfície do solo, (xiii) A operação do sistema admite uma aplicação de água nas partes iniciais do sulco que pode exceder a capacidade de armazenamento no ambiente radicular da cultura. Entretanto, esse excesso pode retornar às raízes, por ascensão capilar, ou se incorporar à superfície freática, por percolação. Assim, permanece disponível na bacia hidrográfica e, portanto, não pode ser considerada uma perda efetiva de água como a evaporação. Além disso, sendo incorporado à superfície freática, deve retornar aos mananciais com melhor qualidade, devido à efetiva filtragem que o solo oferece nesse processo, (xiv) Grande potencial para a geração de empregos diretos e indiretos, com maior e menor qualificação, (xv) Acentuada dependência à topografia, podendo requerer sistematização da superfície, para assegurar uma declividade relativamente uniforme na direção do escoamento e favorecer a uniformidade de distribuição de água na área irrigada, (xvi) Inadequado para solos rasos, pedregosos ou excessivamente permeáveis que podem resultar em dificuldades para instalação ou restringir o alcance lateral da água no solo e acentuar o processo de percolação à superfície freática, (xvii) Parâmetros hidráulicos variáveis com as sucessivas irrigações que promovem modificações na condição superficial e nas características de infiltração, requerendo medidas corretivas na vazão e/ou no período de aplicação de água, para assegurar níveis satisfatórios de desempenho, (xviii) Integrado às áreas para as quais está dimensionado. Portanto, à exceção do equipamento utilizado na distribuição da água, não pode ser deslocado para outras áreas, como ocorre em sistemas por aspersão convencional ou mecanizados, (xix) Dificuldades para operação noturna e automação, quando comparado aos sistemas de irrigação pressurizados, (xx) Em geral, marginalizado em cursos de graduação, pós-graduação e aperfeiçoamento, provavelmente por desconhecimento de suas potencialidades, apesar da expressiva predominância mundial em diversas culturas extensivas, frutíferas e hortaliças, além de satisfazer protocolos rigorosos de desempenho, economia, ambiência e inclusão social, (xxi) Divulgação limitada ou inexistente por não envolver interesses comerciais, dificultando a aceitação, discussão e solução de muitos problemas de natureza técnica ou prática. O número de usuários no país, em geral, é reduzido e disperso, dificultando ações associativas, (xxii) Requer

assistência técnica especializada para orientar o dimensionamento e a operação do sistema e o manejo das irrigações. Entretanto, essas informações são facilmente assimiladas pelos irrigantes interessados que, através de uma desejável interação com o sistema de irrigação, tornam-se competentes gestores dessa tecnologia, (xxiii) A exigência de acompanhamento no campo impõe dificuldades que, em geral, favorece outros sistemas de irrigação, com maior facilidade no dimensionamento e operação, além de estimular a conveniência, muitas vezes assumida, de repassar essa responsabilidade às empresas revendedoras de equipamentos comerciais pressurizados, e (xxiv) Impossibilidade de aplicar "*variable rate irrigation*" e dificuldades para inserção na "*Internet of Things*" podem desestimular o envolvimento de pesquisadores motivados por essas atualidades tecnológicas. É inexpressivo o número de profissionais envolvidos em irrigação por sulcos, o que contribui para a usual omissão em iniciativas de incentivo à agricultura irrigada no país.

10.2 O processo de irrigação de baixo custo por sulcos

Hidraulicamente, o processo de irrigação por sulcos é descrito como escoamento não uniforme, instável e gradualmente variado, em meio poroso, seção irregular e infiltração variáveis com o espaço e o tempo, descrito pelas equações da continuidade e quantidade de movimento (Equações de *Saint Venant*). Soluções analíticas dessas equações diferenciais parciais, não lineares e hiperbólicas não são disponíveis. Portanto, a solução é normalmente aproximada por métodos numéricos, em geral, diferenças finitas. As analogias hidráulicas são o rastreamento da onda de choque em rompimento de barragens e a propagação de tsunamis em oceanos e áreas costeiras. O dimensionamento de canais, com seções de escoamento geométricas bem definidas e sem infiltração, requer procedimentos computacionais mais simplificados.

O conceito de irrigação de baixo custo envolve importantes modificações nos conceitos clássicos associados ao dimensionamento e operação de sistemas de irrigação tradicionais. Em consequência, o processo de irrigação por sulcos, aqui considerado, será simplificado, resumindo-se a apenas duas fases principais: avanço e recesso da água na superfície de escoamento. As fases de reposição (o período necessário para haver a reposição da quantidade de água requerida em todo o comprimento do sulco) e depleção (o período necessário para a água ser removida da superfície na extremidade inicial do sulco, após a interrupção no fornecimento) não serão consideradas nesta análise. Assim, a maior parte da reposição de água ao solo deve ser assegurada durante a fase de avanço.

Portanto, para cada ponto inserido no comprimento do sulco, a diferença entre o tempo de recesso (quando a água desaparece da superfície) e o de avanço (quando a água atinge aquele ponto) determina o período de infiltração. Períodos de infiltração semelhantes, associados a pequenas variações no perímetro molhado ao longo do comprimento, favorecem a uniformidade de distribuição de água.

Deve-se considerar, entretanto, que a razão de infiltração em solos agrícolas diminui com o tempo, ou seja, 30 minutos de ocorrência de um processo de infiltração, podem incorporar, por exemplo, 20 mm de água; porém, 60 minutos devem corresponder a lâminas bem inferiores a 40 mm. Essa redução torna-se mais significativa com o aumento do tempo do processo de infiltração. Portanto, diferenças no tempo de infiltração não resultam em diferenças proporcionais nas quantidades infiltradas ao longo dos sulcos, uma condição que será oportunamente explorada para favorecer o dimensionamento desse sistema.

A determinação de equações simples para representar o processo de infiltração em sulcos, nas condições onde as irrigações são praticadas, é fundamental para o dimensionamento e avaliação desse sistema e, portanto, deve ser executada por pessoal técnico especializado. Aos interessados, recomenda-se consultar o trabalho publicado por Scaloppi *et al.* (1995) para maiores detalhes sobre o procedimento teórico e computacional dessa determinação.

10.3 Preparo da área a ser irrigada

A primeira providência consiste em adequar a condição da superfície do solo ao sistema de irrigação, através de uma mobilização do solo com implementos apropriados (grade aradora e niveladora ou enxada rotativa). Em seguida, sistematizar a superfície (eliminar irregularidades) utilizando implementos mecanizados adequados (plana niveladora ou lâmina traseira) procurando manter uma declividade uniforme na direção retilínea ou em contorno, dependendo da condição topográfica original do terreno. Cultivos sucessivos na mesma área contribuem para aprimorar a uniformidade da superfície. Por outro lado, o inconveniente de gradientes significativos na direção transversal ao escoamento consiste em um eventual transbordamento e rompimento da seção de escoamento, que poderá resultar em um processo de erosão localizada difícil de ser corrigido. Em alguns locais, é recomendável dividir a área em parcelas que apresentam condições topográficas semelhantes que serão dimensionadas separadamente. Trabalhos mais rigorosos em tecnologia devem merecer consulta aos textos publicados por Scaloppi e Willardson (1986) e Scaloppi (2003b).

Após a sistematização, marcar uma desnivelada básica representativa, com declividade média entre 0,5% e 1%, que definirá a direção das linhas de plantio (os maiores valores de declividade são recomendáveis em condições mais grosseiras ou ausência de sistematização). Ajustar a desnivelada, procurando respeitar as curvaturas observadas no terreno. Caso o comprimento seja limitado pelas dimensões da área (em geral, inferior a 100m) será assumido que o comprimento das parcelas já está definido. Por outro lado, sendo essas dimensões mais expressivas, com algumas centenas de metros, o comprimento dos sulcos deverá ser determinado por procedimentos apresentados oportunamente.

10.4 Classificação do sistema de irrigação de baixo custo por sulcos

Duas alternativas podem ser consideradas nesse sistema: (i) Aplicação de vazão constante aos sulcos, e (ii) Aplicação de vazões continuamente reduzidas aos sulcos.

A diferença operacional entre as duas alternativas baseia-se na declividade da tubulação responsável pela derivação de água aos sulcos. Na primeira, a tubulação é posicionada em nível e a reduzida perda de carga praticamente assegura uma vazão uniforme nos orifícios em operação. Nesse caso, os orifícios inoperantes devem ser bloqueados, simplesmente deslocando-se um segmento do tubo sobre os mesmos, reproduzindo os tradicionais "*gated pipes*" ou tubos janelados, amplamente utilizados em áreas irrigadas por sulcos.

Na segunda alternativa, a tubulação é posicionada seguindo um gradiente de declive uniforme e a vazão do projeto é bloqueada por um plug instalado em seu interior. Esse bloqueio determina pressões diferenciais nos orifícios, resultando vazões progressivamente reduzidas à medida que se afasta do plug. Toda a vazão do projeto é derivada a um número de orifícios determinado pela declividade da tubulação e diâmetro dos orifícios que devem estar desobstruídos. Como o plug não assegura

estanqueidade recomenda-se destinar esta reduzida vazão transpassante ao último sulco da área irrigada.

10.5 Composição do sistema de irrigação

Pesquisadores do USDA *Agricultural Research Service*, em Kimberly, Idaho, EUA, (KEMPER *et al.*, 1981) desenvolveram um equipamento para aplicação de água aos sulcos, denominado "*cablegation*" que foi adaptado com razoável sucesso à exigência do conceito de baixo custo (Figura 2) com a aplicação de vazões progressivamente reduzidas. Apropriadamente, os autores descreveram o equipamento como "*automatic furrow irrigator*", sendo assim reconhecido pelo *Soil Conservation Service* (USDA).



Figura 2. Irrigação de baixo custo por sulcos com 180 m de comprimento em área demonstrativa da FCA/Unesp, em Botucatu, SP.



Figura 3. Detalhe da parte superior de uma garrafa PET de 2 L que atuará como um plug no interior da tubulação.

O sistema simplificado consiste basicamente de uma pequena caixa de recepção de água (cerca de 50 L) conectada a uma tubulação de PVC para aplicações sanitárias (esgoto) com 100 mm de diâmetro nominal (DN 100), no interior da qual desloca-se um plug constituído pela parte superior de uma garrafa PET de 2 L (Figura 3). Este artefato

é conectado a um fio de nylon preso a um esticador de arame liso para cercas que deve ser fixado à parte superior da caixa de recepção (Figuras 4 e 5).



Figura 4. Parte superior da garrafa PET de 2 L e linha de nylon para bloquear o escoamento na tubulação e forçar a saída de água nos orifícios.



Figura 5. Detalhe da roldana e do esticador, adaptado com uma manopla para facilitar a operação, instalados na caixa de recepção.

A derivação de água aos sulcos é obtida através de orifícios perfurados na tubulação, tendo dimensões ajustadas ao comprimento dos sulcos, e seguindo um alinhamento posicionado cerca de 60° em relação à superfície do terreno (Figura 6). A tubulação deve ser instalada procurando atender a uma declividade uniforme mínima de 0,5%, para favorecer a distribuição de água. Caso a condição topográfica natural da superfície não favoreça a exigência de uniformidade, deve-se providenciar a instalação de estacas de madeira para apoiar a tubulação (Figura 6), procurando um posicionamento o mais próximo possível da superfície, para evitar a desagregação do solo causada pelo impacto da água que flui através dos orifícios. Em qualquer condição, entretanto, recomenda-se dispor um anteparo na área de impacto, para dissipar a energia cinética causada pelo lançamento da água sobre a superfície de escoamento, sendo o mais usual a utilização de embalagens plásticas descartadas de fertilizantes, sementes, rações, etc.



Figura 6. Vazões decrescentes aplicadas através de orifícios perfurados na tubulação a 60° em relação à superfície. A suspensão em estacas uniformiza o gradiente de declive.

A irrigação inicia na extremidade inicial da tubulação e movimenta-se em direção descendente, deslocando-se o plug conectado ao esticador através de uma linha de nylon com diâmetro aproximado de 0,5 mm. O período para o deslocamento do plug resume um procedimento operacional criterioso, que deve resultar em um desempenho satisfatório da irrigação, conforme será discutido a seguir.

A vazão recebida pela caixa e a declividade da tubulação determinam o número de sulcos irrigados simultaneamente. A pressão diferencial em cada orifício resulta em vazões decrescentes, a partir do orifício mais próximo ao plug. Assim, cada sulco receberá uma sucessão de vazões em cada aplicação. Este esquema favorece a condição de escoamento, proporcionando maiores distâncias de avanço com as maiores vazões, que vão sendo sucessivamente reduzidas, uma operação que se aproxima do regime de aplicação denominado "*surge flow*" ou "*pulse flow*", introduzido por Stringham e Keller (1979).

A redução na razão de infiltração, que constitui a base do sucesso do "*surge flow*", é atribuída aos seguintes processos (STRINGHAM *et al.*, 1988): (i) migração e consolidação das partículas do solo reduzindo a permeabilidade na região próxima à superfície (SAMANI *et al.*, 1985). Durante o recesso, a fração mais grosseira (areia) sedimenta-se primeiro, seguida pelas partículas mais finas (limo e argila) que acabam selando a superfície e reduzindo a infiltração, (ii) aprisionamento do ar que penetra na superfície do solo durante a interrupção na aplicação de água (LINDEN *et al.*, 1977) causando uma pressão contrária à infiltração, (iii) redistribuição de água reduz o gradiente hidráulico no perfil do solo responsável pela infiltração, e (iv) redução da rugosidade hidráulica da seção de escoamento causada pela migração de partículas com as sucessivas irrigações, favorecendo o escoamento superficial.

10.6 Dimensionamento de sistemas de irrigação de baixo custo por sulcos

O dimensionamento de um sistema de irrigação de baixo custo por sulcos consiste em se atribuir dimensões a três parâmetros básicos: (i) comprimento das parcelas, (ii) regime de aplicação de água aos sulcos (vazões), e (iii) período de aplicação de água.

Maiores detalhes sobre o dimensionamento de sistemas de irrigação por superfície, incluindo faixas e inundação para o cultivo de arroz, podem ser obtidos em Scaloppi (2003a). Quando as características topográficas da área não são uniformes, pode ser necessário executar operações preliminares de sistematização ou regularização da superfície. Deve-se destacar, entretanto, que as áreas potencialmente favoráveis ao sistema por sulcos devem apresentar uma topografia relativamente plana (inclinação máxima em torno de 5% na direção transversal) e uniforme (manutenção da direção da declividade). Na direção do escoamento, a declividade não deve ultrapassar 2% e, preferencialmente, entre 0,5 e 1%. Esse valor pode compensar pequenas variações que ocorrem no gradiente de declive, evitando sua reversão, principalmente, em condições menos rigorosas de sistematização.

Convém esclarecer que à medida que se afastam as condições favoráveis ao sistema, não significa sua exclusão sumária, porém, um aumento nos custos e maiores cuidados dimensionais e operacionais para evitar eventuais comprometimentos ambientais.

O dimensionamento pode ser conduzido sob duas possibilidades: (i) simulação utilizando modelos matemáticos (SCALOPPI, 1996); ou (ii) um procedimento empírico executado nas condições do projeto. Deve-se destacar que os modelos de simulação requerem determinações locais de equações representativas da infiltração (SCALOPPI *et al.*, 1995) e da geometria da seção de escoamento, através de determinações procedidas no campo, após se comprovar uma aceitável definição dos elementos geométricos no sulco, utilizando um perfilômetro, conforme procedimento detalhado em Scaloppi (2003a).

10.7 Determinação do comprimento dos sulcos

É importante observar, que o regime de aplicação de água deve estar associado ao comprimento das parcelas para resultar no melhor desempenho da irrigação, cuja avaliação será discutida oportunamente. Assim, tendo dimensões reduzidas, identificar a vazão e o período de aplicação que proporcionem os melhores desempenhos. Em condições extensivas, o regime de aplicação deve promover o acréscimo do comprimento dos sulcos, sem comprometer o desempenho. Dois regimes serão apresentados: vazão constante e vazão progressivamente reduzida.

10.7.1 Regime com vazão constante

A vazão requerida em um projeto independe do sistema de irrigação considerado, exceto pela expectativa da eficiência de aplicação e do período operacional diário, sendo computada pela equação (1):

$$Q = \frac{10 \cdot A \cdot D}{E_f \cdot T} \quad (1)$$

em que Q se refere à vazão requerida ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), A à área irrigada (ha), D à demanda hídrica da cultura adotada no dimensionamento (mm d^{-1}), E_f à eficiência de aplicação de água pretendida (adimensional e decimal), e T ao período operacional da irrigação (h d^{-1}). Recomenda-se que esse período seja ponderado em base semanal, quando pode estar prevista interrupção operacional, usualmente programada para os finais de semana.

Partindo da vazão requerida, a primeira providência consiste em determinar a vazão a ser aplicada a cada sulco, através de observações do escoamento superficial nas condições do projeto.

As características da instalação, como o diâmetro dos orifícios de derivação de água aos sulcos e o gradiente hidráulico da tubulação, que determina a carga manométrica nos orifícios, determinam o número de sulcos irrigados simultaneamente. Dividindo-se a vazão requerida por esse número, obtém-se a vazão média. Por sua vez, o tempo de aplicação de água em cada sulco pode ser estimado, dividindo-se o volume requerido pela vazão média, conforme estabelece a equação (2):

$$T = \frac{L \cdot w \cdot z}{q} \quad (2)$$

em que T se refere ao tempo de aplicação de água em cada sulco (min), L ao comprimento do sulco (m), w à largura da faixa de reposição de água desejada (m), z à lâmina de reposição requerida (mm), e q à vazão média de aplicação ($L \text{ min}^{-1}$).

10.7.1.1 Procedimento de cálculo

Aplicando-se a vazão máxima não erosiva a um sulco pode-se avaliar, simultaneamente, pelo método do balanço volumétrico proposto por Scaloppi *et al.* (1995), duas características importantes no dimensionamento e manejo da irrigação: o avanço da frente líquida e a infiltração. Assim, o comprimento mais adequado das parcelas fica facilmente evidenciado, após executar uma consistente avaliação de desempenho, conforme será demonstrado em sequência.

O diâmetro da tubulação e dos orifícios depende das dimensões da área irrigada e, particularmente, do comprimento das parcelas. Na versão mais usual, a tubulação utilizada é DN 100, especificada para esgotamento sanitário, com diâmetro nominal de 100 mm, perfurada com orifícios de 3 cm de diâmetro, para sulcos entre 100 e 200 m de comprimento.

Após aplicar a vazão máxima não erosiva, anotar os tempos de avanço até a frente líquida reduzir-se apreciavelmente, conforme ilustrado na Tabela 1. Em seguida, calcular as lâminas médias aplicadas quando a água atinge as estacas de interesse previamente identificadas.

10.7.1.2 Exemplo numérico

Vazão = $0,4 \text{ L s}^{-1}$. Lâmina média requerida = 30 mm. Largura da faixa de reposição de água = 0,6 m.

Tabela 1. Avanço da água na superfície de escoamento do sulco.

Tempo (min)	2	4	7	12	18	26	36	48	62	80
Distância (m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Essas informações permitem comparar as seguintes alternativas de dimensionamento:

(i) Assumindo um comprimento de 80 m, com um tempo de avanço de 48 min:

$$\text{Vazão} = 0,4 \text{ L s}^{-1} = 24 \text{ L min}^{-1} = 1440 \text{ L h}^{-1},$$

$$\text{Volume aplicado} = 48 \text{ min} \times 24 \text{ L min}^{-1} = 1.152 \text{ L, e}$$

Lâmina média aplicada = $1.152 / (80 \times 0,6) = 24 \text{ mm}$, insuficiente para repor a lâmina requerida.

(ii) Assumindo um comprimento de 100 m, com um tempo de avanço de 80 min:

Volume aplicado = $80 \text{ min} \times 24 \text{ L min}^{-1} = 1.920 \text{ L}$, e

Lâmina média aplicada = $1.920 / (100 \times 0,6) = 32 \text{ mm}$.

Observa-se que o comprimento de 100 m resulta em lâminas médias aplicadas que se aproximam da requerida, revelando-se como o mais adequado. Estando o comprimento definido, executar diques de contenção no final dos sulcos com a finalidade de eliminar o deflúvio superficial e aumentar a reposição hídrica das áreas de remanso (Figura 7). Por outro lado, havendo continuidade da área irrigada, o equipamento será deslocado para prosseguir a operação sequencial da irrigação.

Para obter uma avaliação criteriosa do desempenho da irrigação, é necessário estimar a distribuição do perfil infiltrado ao longo do comprimento do sulco, através de uma equação representativa da infiltração determinada no local. Esse procedimento computacional será demonstrado oportunamente. Entretanto, é possível antecipar uma avaliação expedita, assumindo uma lâmina líquida de 28 mm, com turno de irrigação de 7 dias, operando 10 h/d, em uma área hipotética cultivada de 2 ha:

Área irrigada por sulco = 60 m^2

Área cultivada por sulco = 100 m^2

Área efetiva irrigada = $0,6 \times 2 \text{ ha} = 12.000 \text{ m}^2$

Volume de água requerido pelo projeto = $(1,92 \text{ m}^3/60 \text{ m}^2) \times 12.000 \text{ m}^2 = 384 \text{ m}^3$

Vazão = $384 \text{ m}^3/70 \text{ h} = 5,5 \text{ m}^3/\text{h} = 5.500 \text{ L/h}$

Número de sulcos irrigados simultaneamente = $5.500 \text{ L/h}/1440 \text{ L/h/sulco} = 4 \text{ sulcos}$

10.7.2 Regime com vazões progressivamente reduzidas

Em regimes de aplicação com decréscimos progressivos de vazão, o gradiente de declive da tubulação desempenha um papel importante no esquema operacional. Sendo gradientes mais reduzidos (inferiores a 0,5%), duas alternativas podem ser oferecidas: (i) apoiar a tubulação em estacas instaladas de acordo com o gradiente escolhido, conforme pode ser observado na Figura 6, e (ii) vedar alguns orifícios com vazões mais reduzidas para aumentar a vazão em outros ainda em processo de irrigação. A possibilidade de vedar facilmente os orifícios já irrigados, sobrepondo-se um segmento de tubo ao orifício, favorece bastante a dotação criteriosa de água aos sulcos. Este recurso pode ser utilizado para irrigar os primeiros e os últimos sulcos da instalação, uma vez que seguem uma dotação diferenciada no esquema operacional proposto.

10.7.2.1 Dimensionamento empírico ilustrativo

Aplicar a vazão requerida a um esquema de irrigação instalado, e avaliar o comportamento do escoamento e da infiltração. Por exemplo:

Área = 2 ha cultivados; demanda hídrica estimada = 4 mm/d; eficiência de aplicação prevista = 80% ou 0,8 na aplicação da equação; regime operacional = 10 h/d; lâmina líquida requerida = 30 mm.

Vazão requerida = $10 \times 2 \times 4 / (0,8 \times 10) = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

A determinação do número de orifícios fluindo simultaneamente depende da vazão média observada na instalação. Considerando que tanto a carga manométrica, determinada pela declividade da tubulação, quanto o diâmetro dos orifícios, determinam as vazões em cada orifício, recomenda-se adotar o seguinte procedimento:

Estando a instalação definida, avaliar, tentativamente, o diâmetro dos orifícios objetivando o melhor desempenho da irrigação. Para tanto, perfurar com serra copo apenas os tubos suficientes para conduzir essa avaliação, iniciando com diâmetros reduzidos, por exemplo, 2 cm, que podem ser aumentados gradativamente, até observar um desempenho satisfatório da irrigação nas parcelas irrigadas. Estando o comprimento indefinido, identificar uma combinação de vazões decrescentes que maximizem essa dimensão, sem provocar arrastamento significativo de partículas do solo. A redução do número de orifícios fluindo, determinada pelo aumento do diâmetro dos mesmos, aumenta a vazão média com maiores distâncias de avanço da água nos sulcos.

Assumindo que tenha sido identificado um comprimento satisfatório de 100 m, sendo 0,6 m a largura média da faixa de reposição de água, pode-se calcular:

$$\text{Área de reposição de água por sulco} = 60 \text{ m}^2$$

$$\text{Área cultivada por sulco} = 100 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume de água requerido por sulco} = 60 \text{ m}^2 \times 30 \text{ mm} = 1.800 \text{ L} = 1,8 \text{ m}^3$$

O período para deslocamento do plug independe do número de orifícios fluindo na instalação, sendo calculado pelo volume de água requerido por sulco dividido pela vazão do projeto:

$$1,8 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3/\text{h} = 0,18 \text{ h} = 11 \text{ min}$$

Supondo 4 orifícios em operação simultânea:

$$\text{Vazão média por orifício} = 10.000 \text{ L/h} / 4 \text{ orifícios} = 2.500 \text{ L/h} = 42 \text{ L/min} = 0,7 \text{ L/s}$$

Supondo 8 orifícios em operação simultânea:

$$\text{Vazão média por orifício} = 10.000 \text{ L/h} / 8 \text{ orifícios} = 1.250 \text{ L/h} = 21 \text{ L/min} = 0,35 \text{ L/s}$$

10.7.2.2 Avaliação do desempenho da irrigação

Para avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por sulcos é necessário identificar a equação de infiltração representativa do local, os respectivos períodos de infiltração e os perímetros molhados médios em alguns pontos equidistantes do comprimento. O número de pontos recomendado pode variar de 5 a 10, dependendo do rigor requerido e da conveniência desejada nas determinações realizadas no campo. O procedimento pode ser ilustrado assumindo um dimensionamento consolidado:

$$\text{Comprimento dos sulcos} = 100 \text{ m}$$

$$\text{Largura da faixa de reposição de água por sulco} = 0,6 \text{ m}$$

A largura da faixa de reposição de água (Figura 7) pode ser restrita ao fornecimento de água às raízes das plantas cultivadas, independente do espaçamento entre sulcos ou das entrelinhas da cultura, caracterizando uma forma de irrigação localizada em faixas contínuas. Nesses casos, os cálculos serão efetuados considerando apenas a largura dessas faixas.

$$\text{Volume de água aplicado por sulco} = 60 \text{ cm} \times 30 \text{ mm} = 1.800 \text{ L}$$

$$\text{Perímetro molhado médio dos sulcos} = 0,3 \text{ m}$$

Recomenda-se a execução de dique no final do sulco para conter o deflúvio superficial e aumentar a infiltração na área de remanso do escoamento (Figura 7).

Equação de infiltração ilustrativa obtida pelo procedimento proposto por Scaloppi *et al.* (1995):

$z = 0,5 t^{0,6}$ z = lâmina infiltrada, cm, e t = período de infiltração, min

Período de infiltração = tempo de recesso - tempo de avanço

Volume de água requerido por unidade de comprimento: $Az_r = 60 \times 3 = 18 \text{ L/m}$

Volume de água infiltrado por unidade de comprimento: $Az = 30 \times 0,5 \times t^{0,6} = 15 \times t^{0,6}$

$Az = \text{cm}^3/\text{cm}$; $t = \text{min}$

Adotando-se 6 pontos de determinação uniformemente espaçados de 20 m, calcular as quantidades de água infiltradas anotadas na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidades de água infiltradas calculadas ao longo do comprimento do sulco.

Distância - m	0	20	40	60	80	100	Totais
Recesso - min	90	94	96	98	105	115	
Avanço - min	0	6	18	36	62	90	
Infiltração - min	90	88	78	62	43	25	
Az - cm^2	223	220	204	178	143	103	908
Disponível - cm^2	180	180	180	178	143	104	823
Percolação - cm^2	43	40	24	0	0	0	86

* Os pontos extremos (0 e 100 m) devem ser ponderados por 0,5.



Figura 7. Detalhes das faixas infiltradas a partir dos perímetros molhados e obstrução do escoamento por diques no final dos sulcos (boaspraticasagronicas.com.br).

10.7.2.3 Eficiências de aplicação e de armazenamento de água

A eficiência de uso de água, expressa pela quantidade da produção por unidade de água aplicada, é considerada o principal índice de desempenho porque integra os demais índices adimensionais e pode ser aplicado diretamente na análise financeira do investimento. Porém, na ausência dessa informação, podem-se calcular índices tradicionais de avaliação de desempenho, a eficiência de aplicação - E_{apl} e a eficiência de armazenamento - E_{arm} , conforme será demonstrado a seguir:

Volume aplicado por sulco = 1.800 L = 1.800 dm^3

Distribuindo-se esse volume uniformemente ao longo do comprimento do sulco (100 m), obtém-se:

$1.800 \text{ dm}^3 / (1.000 \text{ dm}) = 1,8 \text{ dm}^3/\text{dm} = 180 \text{ cm}^3/\text{cm} = 18 \text{ L/m}$

Considerando cinco pontos de determinação da infiltração (os pontos extremos representam metade do espaçamento regular adotado) obtém-se:

$$E_{\text{apl}} = \text{água disponível} / \text{água aplicada} = 823 / (180 \times 5) = 0,91 = 91\%$$

$$\text{Percolação} = \text{água percolada} / \text{água aplicada} = 86 / 900 = 0,09 = 9\%$$

$$E_{\text{arm}} = \text{água disponível} / \text{água requerida} = 823 / 900 = 0,91 = 91\%$$

$$\text{Lâmina média aplicada} = 180 \text{ cm}^2 / 60 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$$

$$\text{Lâmina média efetiva} = (823 / 5) / 60 = 2,74 \text{ cm} = 27,4 \text{ mm}$$

$$\text{Turno de irrigação previsto} = 27,4 \text{ mm} / 4 \text{ mm/d} = 6,85 \approx 7 \text{ dias}$$

$$\text{Área efetiva irrigada} = 12.000 \text{ m}^2 = 1,2 \text{ ha}$$

$$\text{Número de sulcos na área irrigada} = 200 / 0,6 = 333 \text{ sulcos}$$

$$\text{Período para irrigar a área total} = 1,8 \text{ m}^3/\text{sulco} \times 333 \text{ sulcos} = 600 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3/\text{h} = 60 \text{ h}$$

Deve-se observar a aceitável representatividade da equação de infiltração utilizada, apesar de ilustrativa, evidenciada no cálculo das lâminas infiltradas ao longo do comprimento dos sulcos (Tabela 2). Este procedimento pode ser atualizado a cada irrigação, utilizando simples rotinas computacionais, possibilitando a introdução de eventuais ajustamentos operacionais em tempo real (KOECH *et al.*, 2014).

10.7.2.4 Quimigação de baixo custo por sulcos

O sistema de irrigação por sulcos pode integrar um equipamento simples para promover a quimigação (aplicação de produtos químicos via água de irrigação). No caso da adição de fertilizantes à água de irrigação (fertirrigação) pode-se parcelar a aplicação e reduzir as perdas por volatilização e eventual percolação. Existe um reconhecimento generalizado para a quimigação ser sistematicamente incorporada aos sistemas de irrigação, melhorando a uniformidade de distribuição do produto aplicado na área irrigada, além de eliminar a utilização de recursos mecanizados ou manuais nessa aplicação. Em adição, o fornecimento gradativo de nutrientes às culturas reduz eventuais perdas e melhora o seu aproveitamento pelas plantas cultivadas.

O equipamento requerido é simplesmente um recipiente volumétrico dotado de um registro, ambos resistentes à ação corrosiva da solução química. O recipiente é instalado sobre a caixa de recepção de água e a solução química é adicionada à água de irrigação na dosagem recomendada (Figura 8). A turbulência da água na caixa de recepção favorece a homogeneização da mistura.

A solução química é introduzida no recipiente, cuja capacidade volumétrica deve satisfazer um período de aplicação pré-determinado. Por exemplo, assumindo-se que o sistema irriga $1.000 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$, determinar a razão de aplicação de 20 kg de ureia por ha, com um recipiente de 20 L.

Solução: dissolvendo-se 10 kg de uréia em água para completar 20 L de solução obtém-se uma concentração de $0,5 \text{ kg L}^{-1}$. A dose de uréia para os $1.000 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ de área irrigada será 2 kg ou 4 L de solução. Portanto, a razão de aplicação será 4 L h^{-1} ($67 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ ou $1,1 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) e o recipiente deverá ser reabastecido a cada 5 h.

Reduzindo a quantidade do produto em solução, aumenta proporcionalmente a razão de aplicação. Por exemplo, 2 kg de uréia em 20 L de solução ($0,1 \text{ kg L}^{-1}$) requer uma aplicação de 20 L h^{-1} e, portanto, reabastecimento a cada hora.

O simples artifício conhecido como vaso ou frasco de Mariotte, representado pelo tubo branco introduzido no recipiente (Figura 8), manterá constante a razão de aplicação até o nível da solução atingir a extremidade inferior do tubo, posicionada acima do registro, local indicativo de reabastecimento.



Figura 8. Equipamento para quimigação de baixo custo em sulcos.

A aplicação exclusiva de fertilizantes orgânicos pode obstruir o registro e, portanto, devem ser lançados diretamente na caixa de recepção, observando a dosagem recomendada de acordo com o procedimento descrito na aplicação de fertilizantes minerais.

Com o parcelamento da fertirrigação, pode-se avaliar a eficácia da aplicação realizada. Sendo necessário, recalcular as dosagens para as próximas aplicações. Para assegurar a preservação ambiental recomenda-se restringir a quimigação apenas à área efetivamente cultivada, eliminando a ocorrência de deflúvio superficial no final dos sulcos.

10.7.2.5 Custo de investimento e operacional do sistema

Conectando-se os tubos DN 100 com auxílio de um lubrificante adequado (sem adesivo) pode-se avaliar o custo de investimento em função do comprimento das parcelas irrigadas. Assim, adquirindo-se 14 tubos (84 m) para irrigar parcelas com 120 m de comprimento, o custo estimado será R\$ 560,00/ha. O restante, caixa de recepção (pode ser sucata), esticador e fio de nylon não deve ultrapassar R\$ 80,00, totalizando então cerca de R\$ 640,00/ha (valores prevalentes no Estado de São Paulo em 2020). Aumentando o comprimento das parcelas ou deslocando o equipamento para irrigar sequencialmente outros 120 m de comprimento, o custo será reduzido pela metade (R\$ 320,00/ha); outro deslocamento e redução a 1/3 (R\$ 213,00/ha), e assim, sucessivamente.

Em condições mais rigorosas de restrições orçamentárias, deve-se considerar também, a possibilidade de adquirir um menor comprimento de tubulação e promover, também, o deslocamento lateral do equipamento na área irrigada. Enfim, existem alternativas para promover uma redução significativa no custo de investimento, procurando adequá-las aos recursos orçamentários disponíveis.

Assumindo a impossibilidade de avaliar um eventual custo relativo ao consumo de energia por bombeamento, em geral, reduzido ou inexistente, resta avaliar o custo de mão de obra para operar o sistema, responsável pela liberação da catraca do esticador a intervalos de tempo definidos. Esta ação promove o deslocamento do plug no interior da tubulação, até alcançar um novo orifício e, conseqüentemente,

interromper a operação daquele com menor vazão. Sendo o deslocamento causado pela pressão hidrostática, a operação consiste apenas em liberar e travar a catraca do esticador instalada na caixa de recepção de água. Por ser simples e eventual, pode ser executada por alguém que esteja envolvido em outras atividades no projeto, onerando modestamente o custo operacional do sistema. A possibilidade de automação deste processo tem sido sempre considerada. A dificuldade, porém, reside em obter colaboração especializada sem comprometer o objetivo de baixo custo intrínseco ao projeto de irrigação proposto.

10.8 Considerações finais

Os primeiros expressivos projetos de irrigação no país foram implementados pela iniciativa governamental, muitas vezes assessorada por empresas de consultoria internacional (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017). Assim, por exemplo, o atual Distrito de Irrigação Nilo Coelho, em Petrolina, PE, originalmente denominado Massangano, tinha a irrigação por sulcos como o principal sistema, mesmo em uma área com solos desfavoráveis, que motivou a oportuna sugestão da *Overseas Development Administration* para aspersão convencional (DISTRITO DE IRRIGAÇÃO NILO COELHO, 2020) e, atualmente, irrigação localizada, bem adaptada à surpreendente fruticultura predominante no projeto.

Fato semelhante ocorreu no Estado de São Paulo (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1972) onde estudos pioneiros identificaram 4,5 milhões de hectares potencialmente irrigáveis, majoritariamente por sulcos. Na verdade, essas iniciativas trouxeram uma experiência internacional, na qual, os sistemas de irrigação por superfície predominavam na maior parte das áreas irrigadas no mundo.

Entretanto, uma inevitável indignação se manifesta atualmente, ao observar grandes áreas irrigadas por sulcos nas mais variadas condições de solos, disponibilidade hídrica e culturas ao redor do mundo e a escassez desse sistema no país. Aparentemente, não se identificam iniciativas para promover sistemas de irrigação desvinculados de interesses comerciais, contribuindo para concentrar esforços de ensino, pesquisa e extensão apenas em sistemas pressurizados. Em algumas excursões empreendidas aos projetos de irrigação em Juazeiro, BA, e arredores, era possível constatar uma irrigação por sulcos, com bom desempenho, em diversas culturas, apesar da limitada orientação técnica. Chamava a atenção os sistemas implantados nas áreas canavieiras da Agrovale, com sulcos de até 300 m de comprimento, executados em Vertissolos muito apropriados ao sistema, ao que parece, orientados por técnicos estrangeiros. Segundo Soares *et al.* (2003) a área irrigada por sulcos aproximava-se de 14.000 ha. Em outra oportunidade, observou-se grande quantidade de mangueiras de irrigação por gotejamento, descartadas por problemas de obstrução, e pivôs centrais em operação, provocando enormes enxurradas em direção aos drenos. Ficou demonstrado que, mesmo sistemas altamente tecnológicos, porém mal orientados, resultam em flagrantes desastres de desempenho e comprometimento ambiental.

Não há informação precisa sobre o número de propriedades agrícolas, com seus titulares descapitalizados, que poderiam ser beneficiados pelo sistema de irrigação aqui proposto. Temos que reconhecer a sutileza do Prof. J.G.Peres, UFSCar, Araras, que em congressos profissionais apregoava, com sabedoria, que estimular a irrigação por superfície no país "*es una tarea calificada para Don Quijote, peleando contra los molinos de viento*". De fato, os adversos da irrigação por superfície têm apresentado apenas argumentos imaginários para justificar seu descrédito nesses sistemas. Seria desejável que direcionassem suas inoportunas manifestações depreciativas aos quatro protocolos

que orientam o desenvolvimento do sistema de irrigação aqui proposto, notadamente, o econômico e o social. É pouco provável identificar alternativa de irrigação com custo de investimento em torno de R\$ 640,00/ha, que pode chegar a R\$ 320,00/ha, reunindo as inquestionáveis características vantajosas aqui discutidas.

Deve-se reconhecer, todavia, a facilidade e conveniência em se dimensionar sistemas de irrigação pressurizados (SCALOPPI; ALLEN, 1993a), até mesmo pivôs centrais (SCALOPPI; ALLEN, 1993b), com informações facilmente disponibilizadas e fornecidas aos confortáveis ambientes climatizados. Ao contrário, a irrigação por superfície não envolve interesses comerciais e requer ensaios no campo, onde muitas vezes, não há sequer cooperação, ressarcimento de despesas ou pagamento de honorários profissionais, apesar de conferir ao técnico, o reconhecimento da autoria e responsabilidade pelo projeto. Considerando essa desfavorável realidade, deve-se reconhecer que, mesmo revelando a potencialidade testemunhada em todo o mundo, a divulgação e opção por sistemas de irrigação por superfície dependem de iniciativas individuais ou apoio de entidades governamentais ou não governamentais, cooperativas diferenciadas ou empresas comprometidas com a melhoria da qualidade de vida dos agricultores. Este apoio poderia constituir equipes técnicas especializadas, a nível regional, para divulgar e orientar os agricultores em seus projetos, que seriam disponibilizados como áreas de demonstração aos interessados em multiplicar essa iniciativa, capaz de transformar agricultores tradicionais em competentes empresários rurais gestores de seus projetos.

Considerando a estimativa da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) de 11,2 milhões de hectares reunindo condições muito favoráveis de recursos hídricos, topografias e solos, para ampliação da área irrigada nacional, é possível reconhecer que uma parte significativa dessa área possa aumentar também, o número de agricultores contemplados em usufruir os benefícios globalmente reconhecidos dos sistemas de irrigação por superfície em suas iniciativas empreendedoras. Entretanto, seria desejável que o aumento no número de agricultores compartilhando a expansão das áreas irrigadas fosse incluído como um dos objetivos dessa promissora realidade.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas da Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**, 86p., 2017. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacao-UsodaAguaAgriculturaIrigada.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURE AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASABE, 2020. Disponível em: <https://www.un-ihe.org/news/l%C3%A1szl%C3%B3-hayde-receives-american-society-agricultural-and-biological-engineers-award>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- BALI, K.; GILL, T.; LENTZ, D.; ZACCARIA, D.; PUTMAN, D. **Automation of surface irrigation systems**. 2015. University of California, Agriculture and Natural Resources, Cooperative Extension, 45p., 2021. Disponível em: <https://ucanr.edu/sites/programteams/files/208233.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Diagnóstico Básico para o Plano Estadual de Irrigação**, DAEE, 1972.
- DISTRITO DE IRRIGAÇÃO NILO COELHO, DINC, 2020. Disponível em: <https://www.dinc.org.br/histórico>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Deficit irrigation practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Water report**, Rome, n.22, 102p., FAO, 2002.

- KEMPER, W.D.; HEINEMANN, W.H.; KINCAID, D.C.; WORSTELL, R.V. **Cablegation**: I. Cable controlled plugs in perforated supply pipes for automatic furrow irrigation. Transactions of the ASAE, St. Joseph, n.6, v.24, p.1526-1532, 1981.
- KOECH, R.; SMITH, R.J.; GILLIES, M.H. A real-time optimization for automation of furrow irrigation. **Irrigation Science**, v.32, p.319-327, 2014.
- LINDEN, D.R.; DIXON, R.M.; GUITJENS, J.C. Soil air pressure under successive border irrigation and simulated rain. **Soil Science**, v.124, p.135-139, 1977.
- OUDA, S.; ZOHRY, A.E.; NORELDIN, T.E. Deficit irrigation - a remedy for water scarcity. **Springer International Publishing**, Switzerland, 196p., 2020.
- SAMANI, Z.A.; WALKER, W.R.; WILLARDSON, L.S. Infiltration under surge flow irrigation. **Trans. ASAE**, v.28, p.1539-1542, 1985.
- SCALOPPI, E.J. **Two-dimensional soil-water flow and solute transport simulation in surface irrigation**. 158p., 1996. Dissertação (Ph.D. em Engenharia de Irrigação) - Utah State University, Logan, Utah, EUA, 1996.
- SCALOPPI, E.J. Irrigação por superfície. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. (Ed.) Irrigação. **Série Engenharia Agrícola**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v.2, p.311-404, 2003a.
- SCALOPPI, E.J. Sistematização da superfície para irrigação e drenagem. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. (Eds.) Irrigação. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, **Série Engenharia Agrícola**, v.2, p.405-470, 2003b.
- SCALOPPI, E.J. Sistemas alternativos de irrigação de baixo custo. Fundação de Estudos Agrônômicos e Florestais, **Boletim Técnico**. Botucatu, SP, v.2, 47p., 2011.
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of irrigation laterals: comparative analysis. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.110, n.1, p.91-115, 1993a. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9437](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9437). Acesso em: 25 mar. 2021.
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.110, n.3, p.554-567, 1993b. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%281993%29119%3A3%28554%29>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- SCALOPPI, E.J.; MERKLEY, G.P.; WILLARDSON, L.S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, n.1, v.121, p.57-70. 1995.
- SCALOPPI, E.J.; WILLARDSON, L.S. Practical land grading based on least squares. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.112, n.1, p.98-109, 1986.
- SKAGGS, R.W.; KRIZ, G.J.; BERNAL, R. Irrigation through subsurface drains. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York, v.98, n.3, p.363-373, 1972.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. USDA. **Cablegation - an automated furrow irrigation system**. NE Leaflet, Lincoln, Nebraska. n.12, 2020. Disponível em: http://irrigationtoolbox.com/IrrigationToolBox/Section7_IWMPlan/CablegationPamphlet.pdf. Acesso em: 25 mar. 2021.
- SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.S.; GOMES, J.R.W.F.; ARAUJO FILHO, A.A. Agrovale, uma experiência de 25 anos em irrigação de cana-de-açúcar na região do submédio São Francisco. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.60, p.55-62, 2003.
- STRINGHAM, G.E.; DUKE, H.R.; WALKER, W.R.; HUMPHERYS, A.S.; EVANS, R.G.; BASSETT, D.L.; MILLER, D.E.; AARSTAD, J.S.; BLAIR, A.W.; SMERDON, E.T.; McCORMICK, P.S.; PODMORE, T.H. Surge flow irrigation. Final Report of the Western Regional Research Project W-163, Utah Agric. Exp. Sta., Logan, Utah, Research Bulletin 515, 92p., 1988.

STRINGHAM, G.E.; KELLER, J. Surge flow for automatic irrigation. In: ASCE IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION SPECIALTY CONFERENCE, Albuquerque, NM, p.132-142, 1979.

TV Unesp, 2015. Ciência Sem Limites: veja como fazer irrigação de baixo custo eficiente. Disponível em: [youtube.com/watch?v=cuEPebF88Nw&ab_channel=TVUnesp](https://www.youtube.com/watch?v=cuEPebF88Nw&ab_channel=TVUnesp). Acesso em: 25 mar. 2021.

UDDIN, J.; SMITH, R.J.; GILLIES, M.H.; MOLLER, P.; ROBSON, D. Smart automated furrow irrigation of cotton. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, New York, v.144, n.5, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001282>. Acesso em: 25 mar. 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. USGS, 2015. Disponível em: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/irrigation-methods-furrow-or-flood-irrigation?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 25 mar. 2021.

CAPÍTULO 11

11 VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO DA AGRICULTURA IRRIGADA

Paulo Cesar Sentelhas

Resumo

O clima e sua variabilidade se constituem num dos principais fatores condicionantes da produção vegetal, determinando o sistema agrícola a ser empregado (sequeiro ou irrigado), o crescimento e o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, os níveis de produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas, além de interferir na relação das plantas com os microrganismos (pragas e doenças) e de afetar as condições para as operações agrícolas de campo. No contexto da agricultura irrigada, além dos aspectos mencionados, as condições meteorológicas interferem no planejamento e dimensionamento dos sistemas de irrigação, assim como no manejo de água, já que as variáveis meteorológicas, juntamente com as características da cultura e do solo, definem a demanda hídrica das culturas (evapotranspiração) e os níveis de *deficit* hídrico a que essas ficam sujeitas ao longo do ciclo. Assim, avaliar a variabilidade das condições meteorológicas e seus impactos no balanço hídrico das culturas e na necessidade de irrigação é fundamental para que se obtenha sucesso com os sistemas irrigados. Além disso, torna-se importante também considerar como as mudanças climáticas, que já vem ocorrendo e as que deverão continuar nas próximas décadas, poderão impactar o uso da irrigação, ou ainda, como a intensificação da irrigação, onde possível, poderá se tornar uma aliada na mitigação dos efeitos negativos das mudanças climáticas na agricultura. Este capítulo abordará, de forma objetiva, os principais aspectos relacionados aos impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no contexto da agricultura irrigada, contribuindo, assim, para que os leitores possam ter uma visão crítica dos impactos do clima futuro na agricultura irrigada e do papel da irrigação na minimização do risco climático para a agricultura e na melhoria da segurança alimentar.

11.1 Introdução

A irrigação é uma prática agrícola que tem por objetivo suprir os requerimentos hídricos das culturas anuais e perenes em épocas ou regiões em que as deficiências hídricas ocorrem com frequência e intensidade elevadas, não permitindo que produtividades economicamente viáveis sejam alcançadas (PEREIRA *et al.*, 2002). Nessas condições, a irrigação poderá ser feita de forma emergencial (salvamento), parcial (irrigação com *deficit*) ou plena, sendo que a lâmina de água a ser aplicada irá depender das características do ambiente de produção (clima e solo), da cultura em questão e sua fenologia e do sistema de irrigação empregado. Sendo assim, a irrigação é uma prática que visa trazer estabilização das produtividades e, conseqüentemente, da oferta de alimentos, fibras e energia, ajudando a atender a demanda desses produtos ao redor do mundo (DÖLL, 2002).

Dentre os fatores que determinam a necessidade do uso da irrigação e como esta deve ser manejada, as condições climáticas figuram como o principal, já que são as variáveis meteorológicas (radiação solar, temperatura do ar, *deficit* de pressão de vapor e velocidade do vento) que definem a magnitude da taxa de evapotranspiração dos sistemas agrícolas, controlando, juntamente com as chuvas, o balanço hídrico das

culturas, que por sua vez define a disponibilidade de água no solo e a necessidade de irrigação (quando e com quanto irrigar) (PEREIRA *et al.*, 2002). Assim, o conhecimento das características climáticas da região, especialmente sua variabilidade sazonal e interanual, é fundamental para o gerenciamento racional dos recursos hídricos de uma propriedade agrícola, desde o planejamento eficiente de projetos até o manejo da irrigação.

Em razão da crescente demanda mundial por produtos agrícolas, a agricultura irrigada figura como uma das possíveis soluções para a elevação da produção agrícola mundial, já que a expansão das áreas agricultáveis está cada vez mais limitada por razões climáticas, ambientais e socioeconômicas. Atualmente, a agricultura irrigada ocupa cerca de 1/5 da área agrícola do mundo, porém é responsável por 2/5 da produção agrícola mundial (DÖLL, 2002). Considerando-se que a área com irrigação que atualmente se tem no Brasil ainda é muito pequena, o potencial de expansão da agricultura irrigada em diversas regiões brasileiras, incluindo aquelas onde agricultura irrigada já vem sendo praticada, é enorme, da ordem de 12 milhões de ha, de acordo com Borghetti *et al.* (2017). No entanto, essa expansão deverá ser feita de forma ordenada, levando-se em conta, inclusive, aspectos relativos à variabilidade e às mudanças climáticas, já que ambas afetam tanto a demanda hídrica das culturas como a disponibilidade de água nos mananciais (rios e reservatórios) para a irrigação.

Se por um lado a irrigação é uma prática que visa incrementar a produção agrícola mundial por meio do uso de terras inaptas ao cultivo de sequeiro, por outro, ela também figura como uma estratégia de mitigação para os possíveis impactos a serem causados pelas mudanças climáticas na produtividade das culturas em áreas onde atualmente essas vem sendo cultivadas sob regime de sequeiro (CUNHA *et al.*, 2014; NECHIFOR; WINNING, 2019). A complexidade deste tema, fez com que nos últimos anos muitos trabalhos abordassem os efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas sob essas duas óticas, ou seja, como as oscilações e alterações climáticas vem impactando e irão impactar a demanda de irrigação e como a irrigação pode vir a ser uma solução para manter a produtividade das culturas em níveis compatíveis com a demanda futura.

11.2 Variabilidade, tendências, anomalias e mudanças climáticas

A variação espacial e temporal do tempo e do clima são características intrínsecas dos sistemas meteorológicos. A variação temporal é uma característica que deve ser estudada em detalhes, já que esta, nas suas mais variadas escalas, permite entender como era o clima local no passado distante (centenas de anos), no passado recente (décadas) e no presente (meses a anos), além de possibilitar, a partir de modelos climáticos globais (MCG), projetar o clima futuro. Para uma melhor compreensão das variações climáticas de um dado local ou região, é pertinente conhecer os conceitos de tempo e clima, assim como de variabilidade, tendência, anomalia e mudanças climáticas. Para tanto, deve-se considerar, de acordo com a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), um período de no mínimo de 30 anos (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007), em que as condições específicas de um dado dia ou período representem a média aritmética das variáveis meteorológicas. Assim, o clima é uma condição média e supostamente estática, enquanto o tempo é extremamente dinâmico (PEREIRA *et al.*, 2002).

A combinação das escalas temporal e espacial dos fenômenos meteorológicos resulta no que se denomina de variabilidade climática, que nada mais é do que a oscilação das condições meteorológicas em torno da média aritmética, também conhecida como normal climatológica. A variabilidade climática é resultante da combinação dos diversos fatores meteorológicos dinâmicos que atuam na região,

associados às variações na circulação da atmosfera. Dentre esses fatores temos o Dipolo do Atlântico (DDA), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o El Niño Oscilação Sul (ENOS), a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ). Para exemplificar a variabilidade climática, a Figura 1 apresenta as chuvas anuais em Piracicaba, SP, entre os anos de 1903 e 2020, as quais apresentam uma variação interanual em torno da normal climatológica (1286 mm), sendo o desvio-padrão dessa série histórica (± 227 mm), a variabilidade esperada. Além disso, a Figura 1 permite, ainda, se observar diversos intervalos de curto prazo com tendências, que representam períodos em que as chuvas são crescentes (tendência positiva), como ocorreu entre 1978 e 1983, ou decrescente (tendência negativa), como foi observado entre os anos de 1947 e 1956, o que, no entanto, não representam mudanças do clima. Finalmente, na Figura 1 é possível se identificar, também, os eventos de chuvas extremas, que vão muito além da variabilidade esperada, o que caracteriza as anomalias climáticas. Essas condições anômalas são normalmente causadas pelos fenômenos naturais já mencionados, sendo o principal deles o ENOS, em suas fases quente (El Niño), fria (La Niña) e neutra. Na Figura 1, observa-se que ao longo dos 118 anos da série histórica de Piracicaba, houve diversas anomalias negativas, como em 1916, 1921, 1978, 1984 e 2014, assim como positivas em 1904, 1911, 1912, 1983 e 1984. O importante, nesse contexto, é entender que tanto as tendências como as anomalias são eventos intrínsecos da variabilidade climática e que essas oscilações nas condições meteorológicas são responsáveis, em grande parte, pelos riscos para a agricultura, seja ela de sequeiro ou irrigada. Finalmente, vale ressaltar que os padrões de variabilidade climática são distintos nas diferentes regiões do Brasil e do mundo, havendo aquelas onde há mais variabilidade sazonal e interanual e outras onde essas variabilidades são menores.

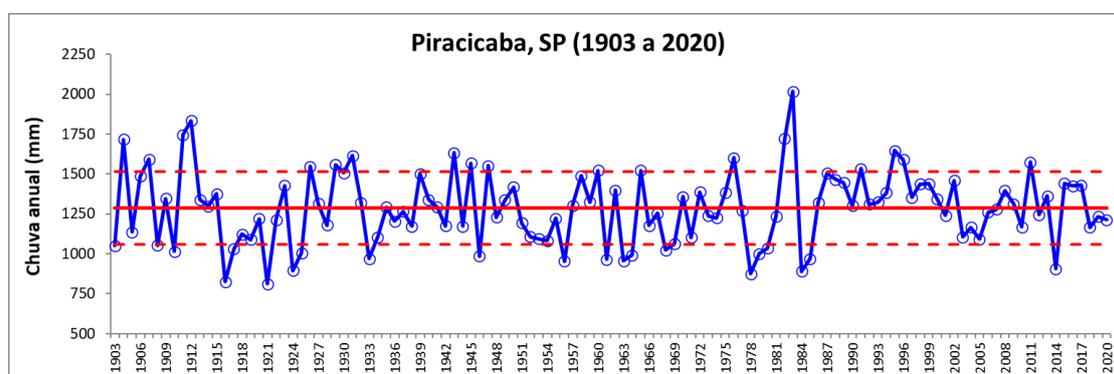


Figura 1. Variação interanual da chuva anual em Piracicaba, SP, de 1903 a 2020, onde são destacadas a condição média (linha vermelha contínua) e a variação esperada (desvio-padrão - linhas vermelhas tracejadas). (Posto Meteorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Esalq/USP).

No caso das mudanças climáticas, esta pode ser considerada como uma tendência de longo prazo, o que denota alteração expressiva da média de uma dada variável meteorológica ou da variabilidade interanual ao longo de períodos sucessivos de pelo menos 30 anos. É importante se ressaltar que os termos variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática estão muitas vezes associados entre si, não havendo uma distinção clara entre eles, já que dependendo da escala de tempo considerada, uma dada variação que poderia ser classificada com uma variabilidade climática numa escala de milênios, seria considerada como uma mudança climática na escala de décadas ou séculos. A Figura 2 apresenta a variação da temperatura média da Terra desde 1850, na qual observa-se uma tendência contínua de aumento da temperatura global, especialmente a partir de 1910. No período entre 1910 e 2018, a

temperatura média global sofreu um aumento de cerca de $1,3^{\circ}\text{C}$, o que caracteriza uma mudança do clima (BERKELEY EARTH, 2020). Isso é confirmado a nível local com os dados apresentados na Figura 3, em que se observa que a temperatura média anual de Piracicaba, SP, sofreu igualmente um incremento de $1,3^{\circ}\text{C}$ em 118 anos, passando de cerca de 21°C para a normal de 1903 a 1932 para $22,3^{\circ}\text{C}$ para a normal de 1990 a 2019.

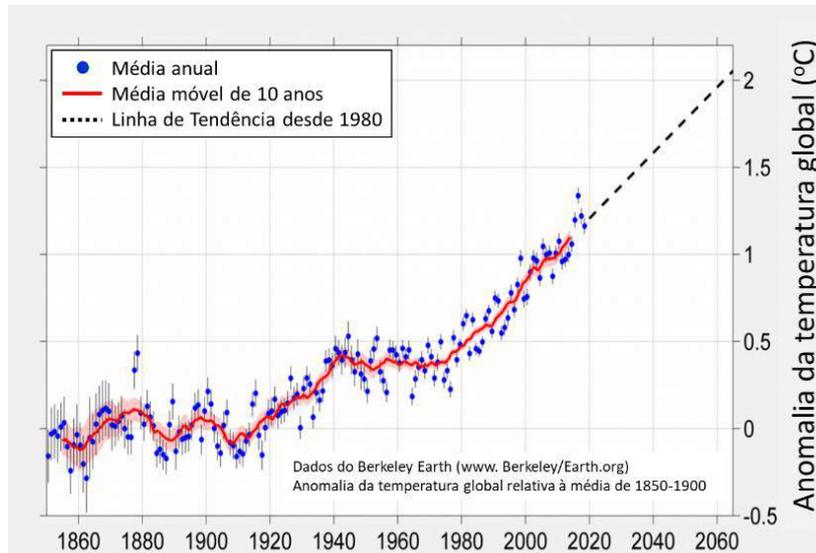


Figura 2. Variação da temperatura média global nos últimos 170 anos, expressa pelas diferenças (anomalias) em relação à média de 1850 a 1900, e a projeção até 2060 (BERKELEY EARTH, 2020).

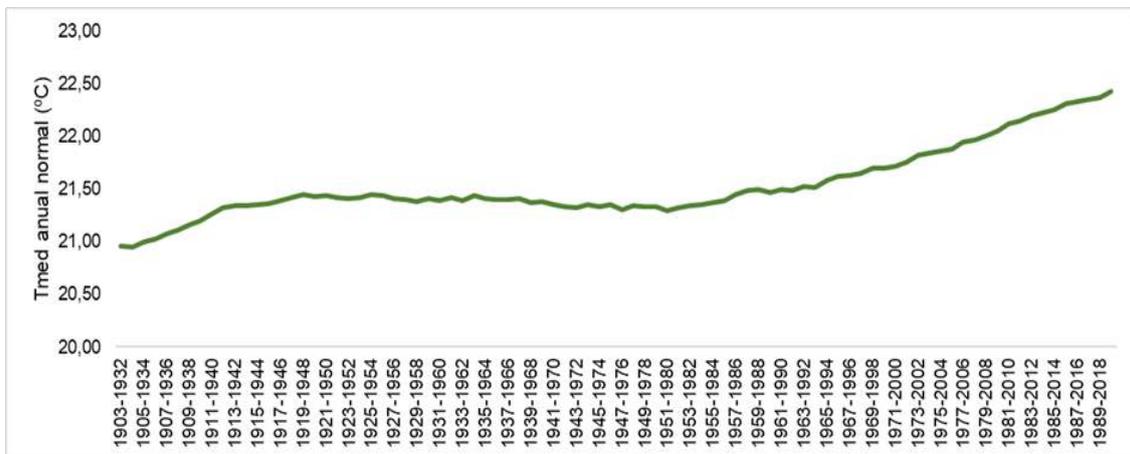


Figura 3. Temperatura média anual normal para períodos sucessivos de 30 anos (1903-1932, 1904-1933, ..., 1989-2018 e 1990-2019) em Piracicaba, SP (VIEIRA, 2020).

Desse modo, é importante se destacar que as mudanças climáticas não estão apenas relacionadas às alterações que estão por vir, mas também com aquelas que já ocorreram ao longo dos últimos séculos, decorrentes de diferentes causas, conforme os fatores apresentados a seguir (PEREIRA *et al.*, 2002): (i) Extraterrestres: neste caso a causa é a variação da atividade solar, como mostra a Figura 4, a qual mostra que de 1880 até 1960 houve um aumento da atividade solar, o que em parte justificou o aumento observado na temperatura global. No entanto, a partir da década de 60 do século XX, a atividade solar primeiramente se estabilizou, passando, então, a diminuir, o que deixou de justificar o contínuo aquecimento global observado especialmente a

partir da década de 1970, (ii) Astronômicas: as causas de origem astronômicas são aquelas relacionadas, basicamente a três aspectos das relações Terra-Sol (Figura 5): precessão, a qual está relacionada ao tempo necessário para que o eixo terrestre transcreva uma volta completa em torno da perpendicular ao plano da Eclíptica (o tempo para que isso ocorra é estimado em 25,8 mil anos); obliquidade, a qual indica a variação da inclinação do eixo terrestre em relação à perpendicular ao plano da Eclíptica, cujo tempo estimado para uma variação completa é de 41 anos; e, finalmente, a excentricidade da órbita, que indica a mudança da distância Terra-Sol, o que estima-se levar por volta de 100 mil anos. Assim, vemos que esses fatores, devido à longa escala de tempo requerida, não podem ser os responsáveis pelas mudanças recentes do clima da Terra e nem das projeções de alteração para as próximas décadas, e (iii) Terrestres: dentre os fatores denominados terrestres, ou seja, que ocorrem exclusivamente em nosso planeta, a modificação da composição química da atmosfera, principalmente pelo aumento emissão dos gases de "efeito estufa" absorvedores de ondas longas emitidas pela Terra, são os mais plausíveis para gerar alteração da condição térmica do planeta. Seja por causas naturais ou antropogênicas, este fator vem sendo considerado como o principal causador das mudanças climáticas recentes (a partir de 1850). No caso da ação antrópica, a intensificação do uso de combustíveis fósseis, os desmatamentos, as queimadas e as atividades agropecuárias são as principais responsáveis pela modificação da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, fator determinante para o aquecimento global, com efeitos que podem durar séculos. Dentre os GEE, o CO_2 , é o principal já que a variação da sua concentração na atmosfera tem sido muito grande ao longo dos últimos 60 anos, como mostra a Figura 6.

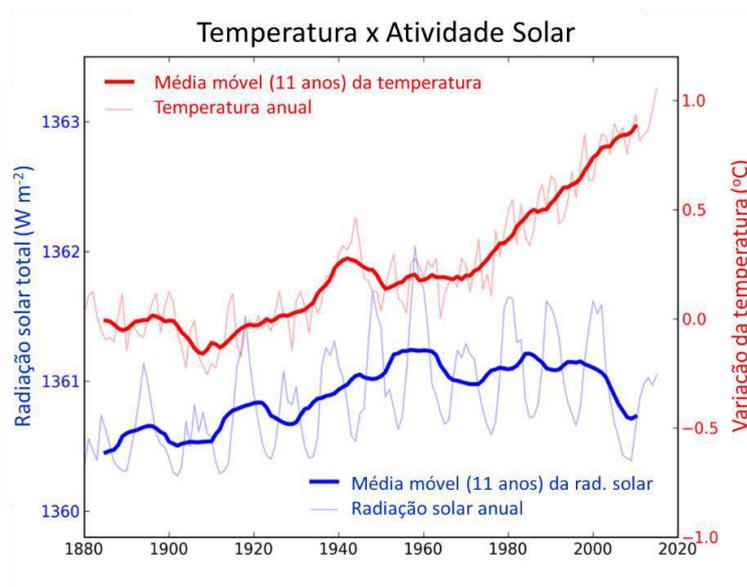


Figura 4. Atividade solar versus variação da temperatura global para o período de 1880 a 2015. Adaptado de NASA GISS & TSI.

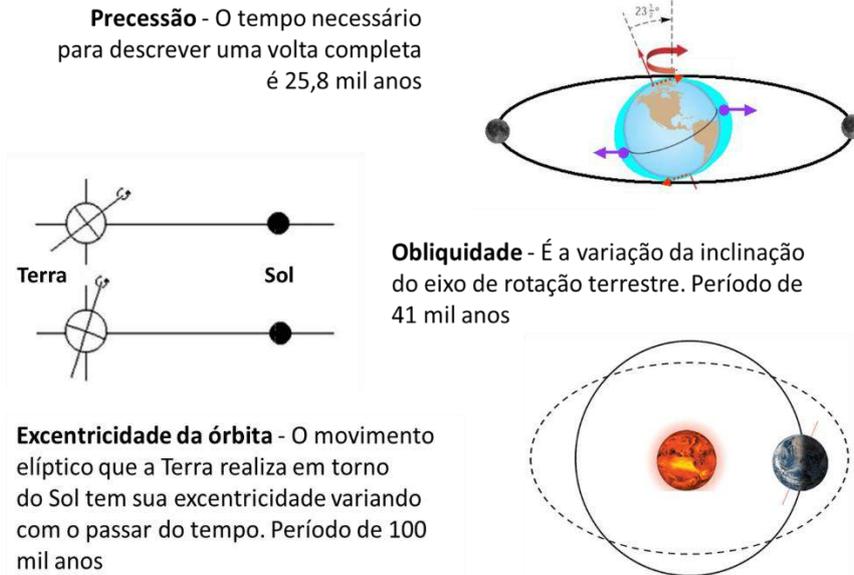


Figura 5. Principais fatores astronômicos responsáveis por mudanças no clima da Terra.

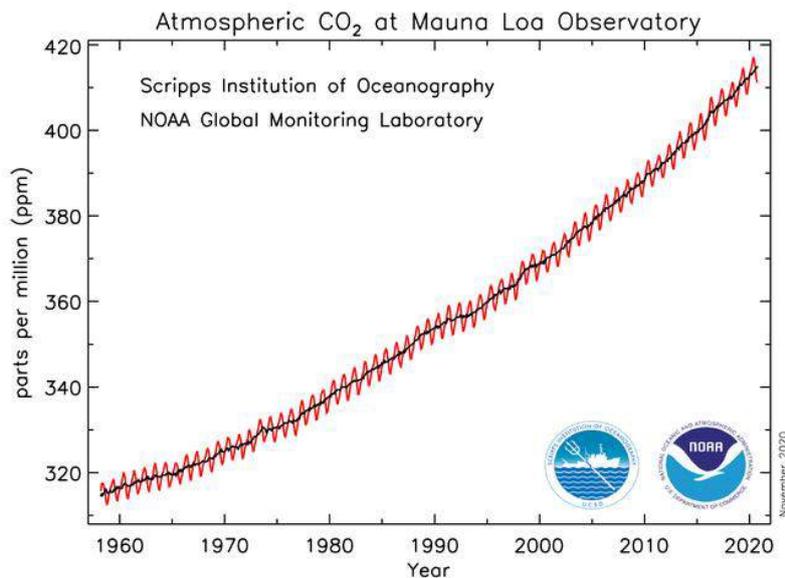


Figura 6. Variação temporal da concentração de CO₂ atmosférico observado na ilha de Mauna Loa, Havaí, Estado Unidos, desde o final dos anos 50 (EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY, 2020).

Considerando-se os fatores causadores das mudanças climáticas listado acima, o mais plausível em termos do que já vem sendo detectado e do que está por vir nas próximas décadas é a alteração da concentração dos GEE, já que há uma alta correlação entre o aumento da concentração de CO₂ (Figura 6) e o aumento da temperatura global (Figura 2).

Diante do quadro traçado pelos últimos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), as projeções climáticas futuras indicam a continuidade do aquecimento global nas próximas décadas (Figura 7). No entanto, o cenário é bastante incerto já que a intensidade da mudança irá depender dos padrões futuros de consumo de combustíveis fósseis. De acordo com a Figura 7, existem basicamente quatro

cenários mais prováveis em que as temperaturas até 2100 podem subir de 1°C até 4°C, respectivamente, para um cenário de menor consumo de combustíveis fósseis (RCP2.5) até um cenário em que os padrões se mantenham nos níveis atuais ou até mesmo piores (RCP8.5). Sendo assim, apesar de haver um consenso de que as temperaturas continuem subindo nas próximas décadas, não se sabe ao certo a que nível chegaremos. A expectativa em relação à emissão de GEE é incerta, o que traz igual incerteza para as projeções futuras de clima. Em decorrência dessas incertezas, as projeções climáticas futuras vêm sendo feitas considerando-se diferentes cenários de emissões, conhecidos como RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que expressam as possíveis trajetórias da concentração de GEE para o futuro e, em função disso, os cenários esperados de temperatura do ar (Figura 7). Com relação às chuvas, os cenários futuros são ainda mais incertos, já que não há consenso entre os modelos empregados para a realização das projeções futuras (Figura 8).

Para o Brasil, os modelos climáticos globais/regionais indicam projeções de elevação das temperaturas, porém, com taxas que variam entre eles. Para a chuva, os cenários não são conclusivos, com indícios de aumento em algumas regiões e redução em outras, dependendo do modelo considerado (AMBRIZZI *et al.*, 2007; MARENGO, 2009; TORRES; MARENGO, 2013; CHOU *et al.*, 2014; REBOITA *et al.*, 2014; SÁNCHEZ *et al.*, 2015).

Projeções da Temperatura do ar x Incertezas

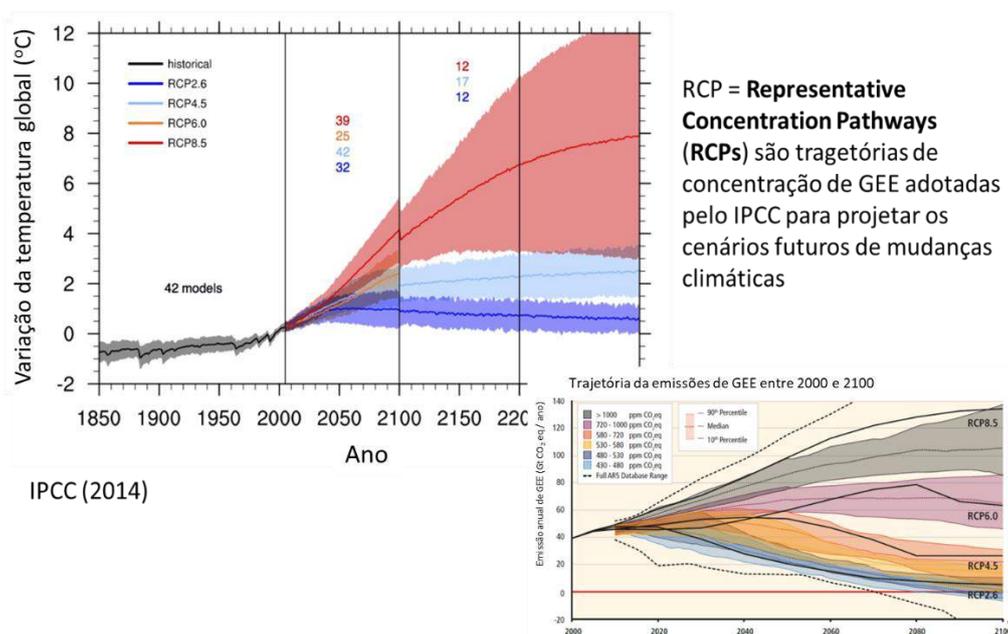


Figura 7. Cenários de mudanças climáticas (temperatura do ar) para os próximos anos em decorrência dos padrões de consumo de combustíveis fósseis (INTERGOVERNAMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE, 2014).

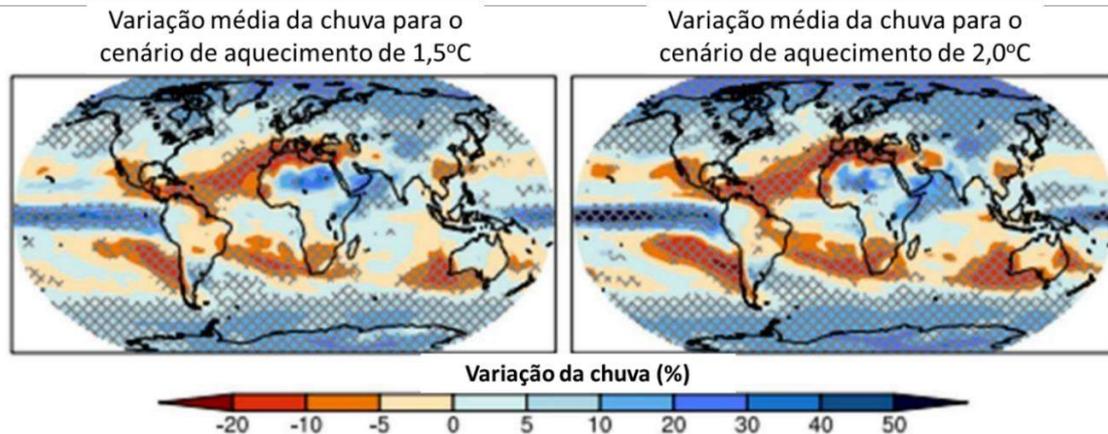


Figura 8. Cenários de mudanças climáticas (chuva) para 2100, considerando-se os cenários de aumento da temperatura de 1°C e 2°C, onde observa-se redução de chuvas em grande parte do Brasil (INTERGOVERNAMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE, 2014).

11.3 Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas

O efeito da variabilidade e das mudanças climáticas nas culturas agrícolas se dará principalmente na duração do ciclo, em função do aumento das temperaturas, e na produtividade, como consequência das alterações nas condições térmicas, hídricas e na concentração de CO₂ (BENDER, 2017). No caso do CO₂, sendo este gás fonte de carbono para o processo fotossintético, espera-se que a elevação de seus níveis aumente a produção de fotoassimilados, promovendo uma maior taxa de crescimento das plantas, resultando em maiores produtividades (STRECK, 2005; MARTINEZ *et al.*, 2015). Por outro lado, a elevação da concentração de CO₂ resultará em redução da condutância estomática, em razão da redução da abertura dos estômatos, reduzindo a taxa de transpiração das plantas (LEAKEY, 2009; SILVA *et al.*, 2012), o que por sua vez irá afetar a quantidade de água absorvida pelo sistema radicular, resultando em redução da quantidade de nutrientes a serem absorvidos. Esse fato poderá levar à necessidade de adubações em maior quantidade de modo a atender as necessidades da cultura para obtenção de altas produtividades (WALTER *et al.*, 2015).

Apesar das abordagens descritas acima serem plausíveis, é esperado que a resposta das diferentes espécies vegetais (C₃ e C₄) à elevação da concentração de CO₂ varie (GRAY; BRADY, 2016). Assim, sob maior concentração de CO₂ as plantas de metabolismo C₃ deverão apresentar uma redução das perdas por fotorrespiração, havendo um aumento na taxa de fotossíntese líquida, enquanto as plantas com metabolismo C₄ não deverão responder na mesma proporção ao incremento de gás carbônico atmosférico (ARAÚJO *et al.*, 2015; MARTINEZ *et al.*, 2015). Por outro lado, as plantas de metabolismo C₄ poderão ser beneficiadas pela elevação na concentração de CO₂, quando submetidas às condições de *deficit* hídrico ou nutricional (LEAKEY, 2009). As respostas das plantas C₃ e C₄ ao aumento na [CO₂] foram avaliadas no estudo de simulação de Jalota *et al.* (2009), os quais mostraram que a duplicação da concentração desse GEE, mantendo-se as temperaturas nos padrões atuais, resultou em aumentos na produtividade nas culturas do milho (6,5%), algodão (5,5%) e arroz (4,9%). Por outro lado, Vanaja *et al.* (2015), utilizando cultivos em câmaras de topo aberto, para três genótipos de milho, sob condições atuais (390 ppm) e de elevada (550 ppm) [CO₂], mostraram ganhos mais expressivos tanto da biomassa da parte aérea, variando de 32 a 47%, como da produtividade de grãos, entre 46 a 127%.

Se considerados os impactos da elevação das temperaturas no crescimento e desenvolvimento das plantas, os efeitos benéficos do aumento da [CO₂] na produtividade das culturas poderão ser anulados, em função dos seguintes fatores: encurtamento do ciclo; aumento da respiração de manutenção; e aumento das condições de estresse hídrico (STRECK, 2005). Tripathy *et al.* (2009) observaram que a redução na produtividade, devido ao stress térmico, pode ser compensada pela duplicação na [CO₂]. Esses autores encontraram que o dobro de gás carbônico na atmosfera pode mitigar as perdas na produtividade devido ao efeito adverso do aumento de até 1°C no caso do milho, 2°C para as culturas do trigo e do arroz, e de até 3°C no caso da cultura do milho. Resultados similares foram obtidos por Jalota *et al.* (2009), que mostraram que as produtividades das culturas de milho, arroz e algodão não foram afetadas quando submetidas a um aumento da temperatura em 2°C e com o dobro da [CO₂] em relação ao cenário atual (390 ppm).

No Brasil, Costa *et al.* (2009) e Bender (2017) mostraram que, sob condições de temperaturas mais elevadas, a produtividade do milho, tanto na safra quanto na safrinha, deverá ser reduzida nos cenários climáticos futuros, mesmo se considerando o aumento na concentração de CO₂ atmosférico, já que os efeitos negativos das temperaturas mais elevadas serão mais pronunciados do que o efeito benéfico do aumento na [CO₂], o que corrobora os resultados de Benlloch-Gonzalez *et al.* (2014) que verificaram que para a cultura do trigo que temperaturas elevadas reduziram os benefícios do incremento da [CO₂], em decorrência do desenvolvimento reduzido do sistema radicular, possivelmente associado à redução na condutância estomática e transpiração, o que ocasionou aumento da temperatura das folhas e do dossel, reduzindo o crescimento e a partição de biomassa. A compensação entre os efeitos negativos do aumento da temperatura do ar e os positivos decorrentes do incremento da concentração de CO₂ na atmosfera também foram observados por Verhage *et al.* (2017) para a cultura do cafeeiro arábica nas principais regiões produtoras do Brasil. Os resultados desse estudo mostraram que as perdas de produtividade decorrentes do aumento da temperatura do ar e do *deficit* hídrico irão aumentar para o período 2040-2070, enquanto as perdas por geada irão diminuir. No entanto, essas perdas de produtividade serão compensadas pelo incremento da concentração de CO₂, havendo inclusive um ligeiro aumento das produtividades (0,8%), desde que mantidas as proporções entre as áreas de produção de sequeiro e irrigada. Mais recentemente, Bender e Sentelhas (2020) observaram para a cultura da batata no Brasil que o impacto das mudanças climáticas irá depender da região produtora e da época de plantio. Na região Sul, a produtividade da batata será beneficiada pelas mudanças climáticas, especialmente no cultivo de inverno. Por outro lado, nas regiões produtoras com climas mais quentes e secos, a produtividade da batata será penalizada nos cenários futuros, especialmente no cultivo de verão, quando as altas temperaturas e o maior *deficit* hídrico limitarão o crescimento das plantas.

11.4 Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no requerimento hídrico das culturas

Sendo as condições meteorológicas o principal fator condicionador do balanço de água no solo, é evidente que tanto a variabilidade como as mudanças climáticas irão impactar o requerimento hídrico das culturas. Enquanto a variabilidade climática faz com que as lâminas de irrigação variem temporalmente, nas escalas sazonal e interanual, e, também, especialmente (THOMAS, 2008), as mudanças climáticas irão provocar aumento das necessidades hídricas das culturas e, conseqüentemente, da lâmina de irrigação requerida ao longo dos anos, apresentando uma tendência crescente e contínua (ZHANG; CAI, 2013).

De acordo com Döll (2002), as mudanças climáticas irão afetar não apenas os recursos hídricos, mas também a demanda hídrica das culturas e vegetações nativas. Assim, a segurança hídrica e alimentar no futuro irá depender, entre outros fatores, dos impactos que as alterações do clima provocarão na demanda hídrica das culturas, na disponibilidade de água no solo e, conseqüentemente, na irrigação. O aumento da evapotranspiração das culturas, resultante das maiores temperaturas, poderão levar a condições mais frequentes de *deficit* hídrico, mesmo que não haja expressivas mudanças no regime de chuvas (volume e distribuição), requerendo irrigação onde antes as culturas eram cultivadas sob a condição de sequeiro e maiores lâminas de irrigação nas regiões onde essa prática já vem sendo empregada (ZHANG; CAI, 2013; RIEDIGER *et al.*, 2014).

Wada *et al.* (2013), em um estudo a nível mundial, indicaram que a tendência observada desde o final da década de 1990, de expansão das áreas de agricultura irrigada no mundo, irá continuar no futuro, fazendo com que o uso de água pela irrigação em relação ao uso total se eleve em relação aos atuais 70%.

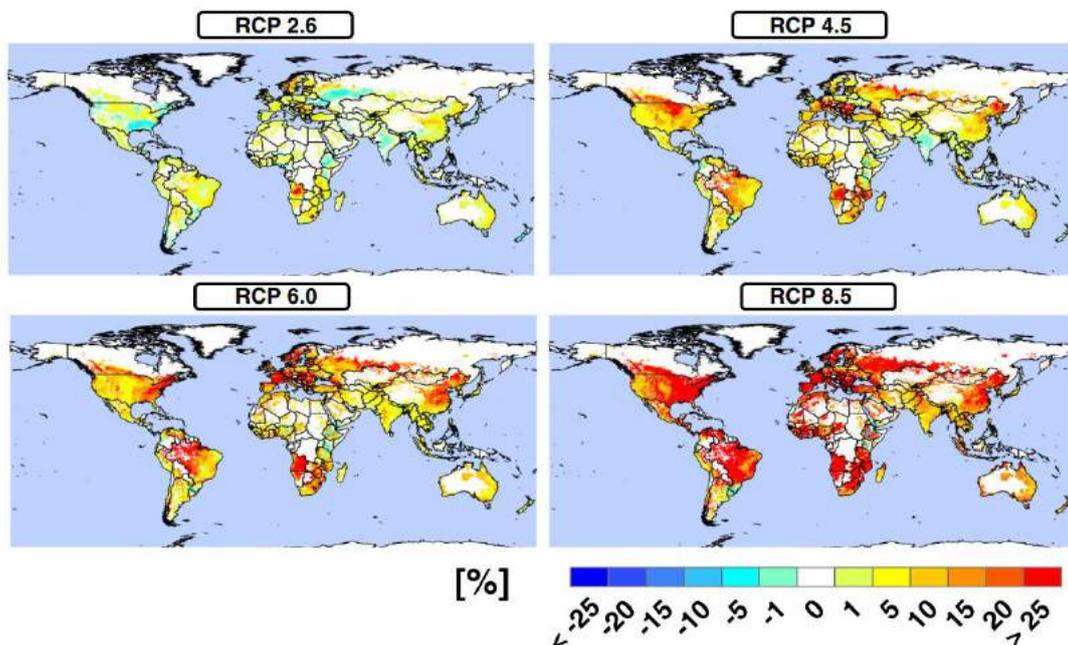


Figura 9. Mudança relativa da demanda de irrigação a nível mundial para o final do século XXI em relação à condição presente (2000). Os resultados são as médias das combinações de cinco modelo hidrológicos globais e cinco modelo climáticos globais, para os quatro cenários de emissões de gases de efeito estufa (RCP2.5, RCP4.5, RCP6.5 e RCP8.5) (WADA *et al.*, 2013).

Assim, a demanda futura de água para a irrigação irá aumentar, apesar das grandes incertezas associadas a essas previsões. Esses autores empregaram sete modelos hidrológicos globais (MHG) para quantificar o impacto das mudanças climáticas projetadas para o final do século XXI na demanda de irrigação para as áreas atualmente irrigadas. A combinação dos diferentes modelos resultou em aumento da demanda da irrigação, porém variando de acordo com o grau de aquecimento e das mudanças nas chuvas nas diferentes regiões do planeta e em função dos cenários de emissões de GEE (RCP) projetados (Figura 9). Sob o cenário menos crítico (RCP2.5), são observadas regiões onde a demanda de irrigação por volta de 2100 irá diminuir, em razão do aumento das chuvas. Isso irá ocorrer principalmente no hemisfério norte, incluindo regiões na América do Norte, Europa e Ásia, enquanto no hemisfério sul haverá um predomínio de leve aumento na demanda por irrigação. Ao se considerar o cenário mais

crítico de emissões de GEE (RCP8.5), a demanda de irrigação irá aumentar consideravelmente em praticamente todas as regiões do planeta, sendo que no Brasil esse aumento deverá oscilar entre 15 e mais de 25% em 2100, com exceção apenas para o extremo sul do país, onde deve haver uma leve redução.

A Figura 10, também extraída de Wada *et al.* (2013), apresenta as relações da variação da demanda de irrigação com o aumento da temperatura (Figura 10a) e com a alteração da chuva (Figura 10b). Observa-se nessas análises que a relação entre a elevação das temperaturas e a demanda de irrigação é mais bem definida, com os coeficientes de correlação (R) para cada RCP variando de 0,54 a 0,97. Já a relação entre a demanda de irrigação e a alteração da chuva apresentou maior dispersão, com R entre 0,01 e 0,78, indicando um maior grau de incerteza em relação ao efeito da variação da chuva na demanda de irrigação, já que os cenários futuros projetados para a chuva são mais variáveis, com aumentos e diminuições em diferentes partes do planeta. Apesar dessas incertezas nas projeções futuras da demanda de irrigação ao redor do mundo, é notório que as mudanças climáticas irão, muito provavelmente, aumentar a necessidade de irrigação. Esse aumento, trará desafios para a produção agrícola mundial, já que em razão da crescente demanda por alimentos, fibras e energia, esta terá que ser substancialmente aumentada, sendo a irrigação um fator decisivo para isso. Assim, todos os atores da cadeia produtiva, desde o agricultor até os órgãos governamentais, terão que trabalhar em conjunto para viabilizar e racionalizar o uso da irrigação.

Os resultados obtidos por Cunha *et al.* (2014) corroboram aqueles encontrados por Wada *et al.* (2013), confirmando a expectativa de que a irrigação será influenciada pelas mudanças do clima e que esse impacto irá variar entre as diferentes regiões brasileiras. Ainda de acordo com Cunha *et al.* (2014), as expectativas a médio prazo (30 anos) é de que haja um aumento no uso da irrigação no país, o que deverá se alterar a longo prazo, em função das limitações hídricas impostas pelas mudanças do clima.

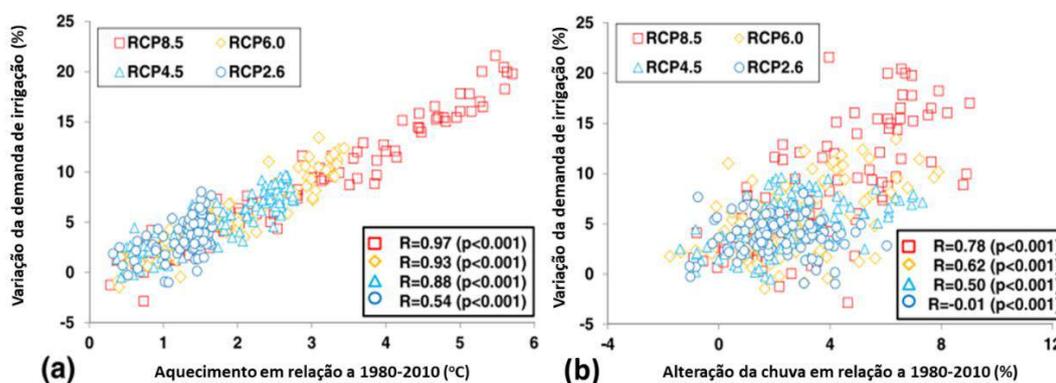


Figura 10. Mudança relativa da demanda de irrigação, a nível mundial, em função do aquecimento (a) e da alteração das chuvas (b), em relação às médias de 1980-2010, para os quatro cenários de emissões de gases de efeito estufa (RCP2.5, RCP4.5, RCP6.5 e RCP8.5). R é o coeficiente de correlação entre as variáveis, enquanto p representa o nível de significância dessas correlações (WADA *et al.*, 2013).

Os resultados apresentados acima mostram claramente que há uma alta probabilidade de que a necessidade de irrigação irá aumentar no futuro, em decorrência das mudanças climáticas, tanto em termos da expansão da área irrigada como da quantidade de água a ser aplicada nas culturas. Considerando-se o cenário futuro mais crítico (RCP8.5 para 2100), o uso de água para irrigação irá suplantar a disponibilidade de água para essa finalidade, o que irá exigir ações de adaptação que considerem, regionalmente, o ajuste do genótipo (maior tolerância a seca), construção de perfil de

solo para maior aprofundamento das raízes e ações de manejo fisiológico de modo a tornar a cultura mais resiliente às altas temperaturas e à seca (RIEDIGER *et al.*, 2014).

11.5 Irrigação como estratégia de mitigação das mudanças climáticas

Entre as possíveis ações para se minimizar as perdas de produtividade das culturas agrícolas sob condições de variabilidade e mudanças climáticas, aquelas associadas ao manejo agrícola, como a adoção de cultivares tolerantes a seca e de ciclo mais tardio, uso da irrigação, alteração da época de semeadura e preparo profundo do solo e adubação, são as mais indicadas (BENDER, 2017), no entanto, o uso dessas práticas de forma isolada ou combinadas nas condições de clima futuro para as mais diversas culturas ainda é pouco estudado (BATTISTI, 2016). Para que estudos dessa natureza possam ser realizados deve-se lançar mão dos modelos de simulação de culturas, os quais permitem avaliar as produtividades em função das características do genótipo, do ambiente (clima e solo) e das ações de manejo. Desse modo, os modelos de simulação permitem, para um dado local e cultura, identificar as melhores ações de manejo (isoladas ou em conjunto) para mitigação dos riscos associados tanto à variabilidade quanto às mudanças climáticas, fornecendo informações detalhadas aos agricultores, formadores de políticas públicas e tomadores de decisão, especialmente para a adaptação da agricultura às alterações do clima (RAUFF; BELLO, 2015).

Um exemplo de estudos dessa natureza foi realizado por Bender (2017) para a cultura do milho nas duas safras empregadas no Brasil. Nesse estudo, a autora empregou como ações de manejo para a mitigação das mudanças climáticas a alteração do genótipo (material mais tardio), a variação da época de semeadura, o aumento da adubação nitrogenada e o uso de irrigação com diferentes níveis de cobertura do *deficit* hídrico. Os resultados desse estudo mostraram que ganhos de produtividade para o milho de verão (Tabela 1) poderão ocorrer, em algumas localidades, nos cenários futuros, tanto na condição de sequeiro, quanto na irrigada, porém com variações, sendo que os maiores incrementos ocorrerão para a condição irrigada. Para a condição de sequeiro a otimização da época de semeadura, do ciclo do cultivar e da adubação nitrogenada levou a ganhos de produtividade apenas a curto e médio prazo e no cenário de emissão intermediário (RCP4.5) e a curto prazo no cenário de alta emissão (RCP8.5), com exceção para algumas poucas localidades e cenários de emissão que apresentaram incrementos de produtividade também a longo prazo. Para a condição irrigada, a otimização do manejo da cultura resultou em ganhos de produtividade na grande maioria dos cenários, exceto para algumas localidades no cenário de longo prazo (RCP8.5). Para o milho safrinha (Tabela 2), as ações de manejo geraram expressivos incrementos de produtividade em relação ao cenário atual, especialmente na condição irrigada. Os resultados apresentados neste estudo indicam que há possibilidade de que as ações de manejo agrícola revertam os impactos negativos das mudanças climáticas nas culturas, especialmente quando combinando-se diferentes estratégias, como também destacado por Altieri e Nicholls (2013).

Tabela 1. Alteração percentual da produtividade do milho de verão sob projeções de clima futuro, em cenários de emissão de GEE intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) para as condições de manejo atual e para as combinações de estratégias de manejo (época de semeadura, ciclo do cultivar, adubação), sem e com o uso de irrigação, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras. Produtividade atingível se refere à produtividade obtida no cenário atual (BENDER, 2017).

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Cenários futuros sem estratégia de manejo							
RSCA	8732	-43	-47	-52	-45	-51	-66
MGPM	6997	-31	-34	-37	-32	-38	-46
MSIV	8668	-47	-54	-59	-51	-60	-75
MTDI	8185	-32	-42	-50	-35	-51	-71
PIBJ	6554	-53	-61	-66	-54	-68	-81
PASF	8614	-27	-38	-46	-28	-50	-68
Cenários futuros + combinação de manejo em sequeiro							
RSCA	8732	7	10	-13	17	-9	-3
MGPM	6997	44	38	35	39	33	5
MSIV	8668	23	3	-3	13	-4	-33
MTDI	8185	27	2	-11	21	-12	-48
PIBJ	6554	19	1	-11	13	-12	-41
PASF	8614	23	7	-6	22	-10	-43
Cenários futuros + combinação de manejo irrigado							
RSCA	8732	70	65	12	76	20	24
MGPM	6997	69	62	59	62	55	28
MSIV	8668	73	55	45	65	45	-3
MTDI	8185	49	19	5	43	2	-42
PIBJ	6554	65	46	31	60	31	-15
PASF	8614	35	20	5	33	1	-35

* RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA.

Apesar dos resultados desses estudos serem promissores, eles devem ser utilizados com cautela, já que tanto os cenários climáticos como os modelos de simulação das culturas apresentam incertezas. Nesse sentido, esses resultados devem ser encarados como exploratórios, servindo, a princípio, para orientar pesquisas sobre a integração de estratégias de manejo que visem a mitigação dos efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas na produtividade agrícola. Além disso, outras ações, como o desenvolvimento de cultivares mais adaptados às condições de estresses térmicos e hídricos também deverão ser investigadas (ANGULO *et al.*, 2013; BATTISTI *et al.*, 2017), já que, segundo Elliott *et al.* (2014), a conversão das áreas de sequeiro

em áreas irrigadas não será suficiente para compensar o efeito negativo das mudanças climáticas na produção agrícola mundial.

Tabela 2. Alteração percentual da produtividade do milho safrinha sob projeções de clima futuro, em cenários de emissão de GEE intermediária (RCP4.5) e alta (RCP8.5) para as condições de manejo atual e para as combinações de estratégias de manejo (época de semeadura, ciclo do cultivar, adubação), sem e com o uso de irrigação, de acordo com as simulações do modelo DSSAT/CERES-Maize, para diferentes regiões brasileiras. Produtividade atingível se refere à produtividade obtida no cenário atual (BENDER, 2017).

Local	Produtividade atingível (kg ha ⁻¹)	RCP4.5			RCP8.5		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
Cenários futuros sem estratégia de manejo							
RSCA	8732	-26	-22	-22	-24	-22	-28
MGPM	6997	-54	-55	-55	-54	-49	-58
MSIV	8668	-65	-70	-71	-66	-70	-78
MTDI	8185	-74	-78	-50	-74	-80	-70
PIBJ	6554	-54	-58	-60	-54	-61	-68
PASF	8614	-44	-52	-59	-45	-59	-73
Cenários futuros + combinação de manejo em sequeiro							
RSCA	8732	7	16	13	-3	7	1
MGPM	6997	158	143	137	152	137	101
MSIV	8668	6	6	-8	3	-4	-36
MTDI	8185	85	56	39	82	26	-16
PIBJ	6554	-14	-21	-26	-19	-28	-41
PASF	8614	42	25	5	37	8	-34
Cenários futuros + combinação de manejo irrigado							
RSCA	8732	38	51	54	15	31	12
MGPM	6997	123	126	130	120	131	105
MSIV	8668	73	62	35	69	42	-15
MTDI	8185	124	82	60	114	44	-11
PIBJ	6554	53	28	10	41	3	-35
PASF	8614	57	39	16	45	21	-29

* RSCA - Cruz Alta, RS; MGPM - Patos de Minas, MG; MSIV - Ivinhema, MS; MTDI - Diamantino, MT; PIBJ - Bom Jesus do Piauí, PI; PASF - São Félix do Xingu, PA.

11.6 Mudanças climáticas e a expansão da agricultura irrigada no Brasil

Considerando-se os cenários climáticos projetados para futuro e os impactos que esses deverão gerar na demanda por irrigação, a expectativa é de que haja uma expansão das áreas irrigadas no Brasil, de modo a atender a demanda crescente, tanto interna como externa, por produtos agrícolas. De acordo com o estudo de Borghetti *et al.* (2017), o Brasil apresenta possibilidade de expansão da área para a agricultura

irrigada, como mostra o mapa da Figura 11, da ordem de 12,5 milhões de ha, sendo cerca de 1 milhão de ha na região Norte, 2,2 milhões de ha na região Nordeste, 4,7 milhões de ha na região Centro-Oeste, 2,5 milhões de ha na região Sudeste e 2,1 milhões de ha na região Sul. Este estudo levou em consideração diversos critérios, incluindo aspectos de disponibilidade de água nas bacias, de relevo, de solo, de clima, entre outras, sendo, portanto, bem criterioso no que se refere à área disponível no país para a expansão da agricultura irrigada. No entanto, o estudo de Borghetti *et al.* (2017) não levou em consideração as possíveis alterações climáticas que deverão ocorrer nas próximas décadas, o que limita sua utilização para fins de planejamento das políticas públicas para incentivo à agricultura irrigada a médio e longo prazo.

De acordo com Rolim *et al.* (2012), devido às mudanças climáticas não é mais conveniente dimensionar sistemas de irrigação com base somente nos dados climáticos históricos e assumir que os resultados obtidos permanecerão inalterados ao longo dos próximos anos. Sendo assim, é importante que o dimensionamento de sistemas de irrigação, assim como a avaliação da área disponível para a expansão da agricultura irrigada, considere também informações relativas às alterações futuras do clima e seus impactos na demanda hídrica das culturas e na lâmina de irrigação.

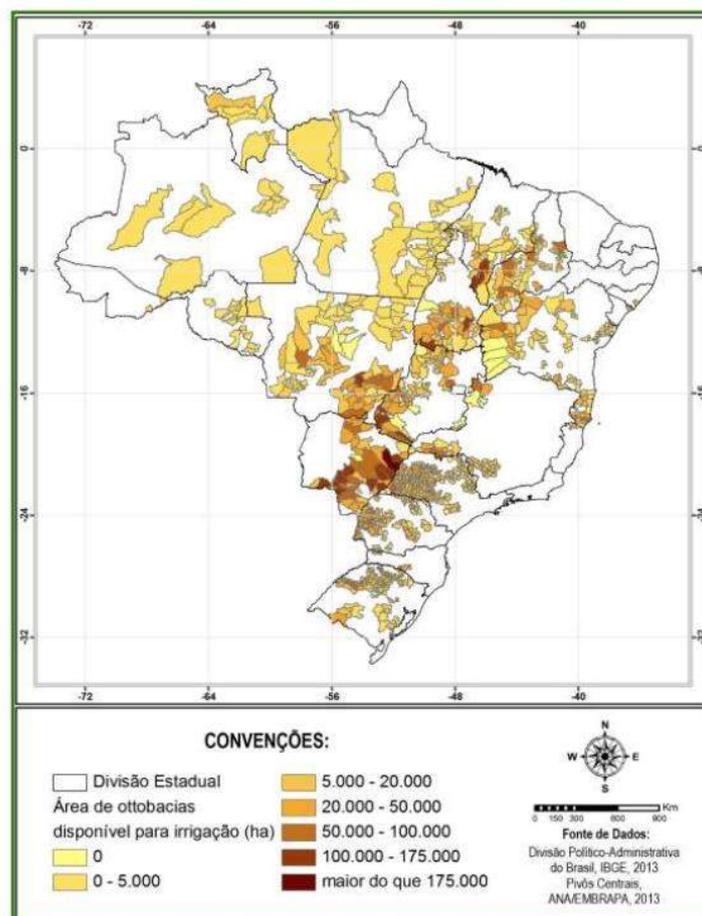


Figura 11. Área efetivamente disponível para expansão da irrigação no Brasil, já descontadas as áreas irrigadas por pivô central (BORGHETTI *et al.*, 2017).

Sendo assim, tomando-se por base as informações do estudo de Wada *et al.* (2013) (Figura 9), que mostra que para o cenário mais crítico de mudanças climáticas para 2100 (RCP8.5) a demanda por irrigação irá aumentar, em média, 25% no Brasil, com exceção para o extremo sul da região Sul, pode-se estimar, de forma aproximada,

que a área disponível para expansão da agricultura irrigada no Brasil, considerando-se a estimativa de Borghetti *et al.* (2017), seria da ordem de 9,4 milhões de ha, ou seja, 25% menor do que a estimativa para a condição climática atual.

11.7 Considerações finais

A agricultura é uma atividade altamente dependente das condições meteorológicas, sendo que grande parte das variações observadas nas produtividades das culturas entre diferentes regiões e anos é decorrente da variabilidade climática. Sendo assim, entender como essa variabilidade do clima impacta as atividades agrícolas é fundamental para que se dimensione os riscos associados a elas. Quando esses riscos estão relacionados ao *deficit* hídrico que ocorre ao longo do ciclo das culturas, a irrigação passa a ser uma operação de grande importância para a estabilização das produtividades, fator decisivo para a segurança alimentar. Apesar da irrigação ser uma prática agrícola que tem por objetivo reduzir os impactos do *deficit* hídrico nas culturas, esta é também uma operação que depende das condições do clima e sua variabilidade, já que a vazão dos rios e córregos, os níveis dos reservatórios, a demanda hídrica das culturas e a disponibilidade de água no solo, são controlados pelas variáveis meteorológicas (balanço hídrico). Assim, qualquer variação das condições meteorológicas, seja de curto, médio ou longo prazo, irão impactar os sistemas irrigados, seja pela maior demanda hídrica das culturas, exigindo a aplicação de maiores lâminas de água, ou pela limitação dos recursos hídricos regionais, dificultando a captação de água para a irrigação. Nesse contexto, as mudanças climáticas projetadas para o futuro deverão impactar sobremaneira a agricultura de sequeiro e irrigada. No caso da cultura de sequeiro, a expectativa é de redução das produtividades, como consequência das maiores temperaturas e períodos com deficits hídricos mais prolongados e intensos. No caso da agricultura irrigada, a demanda hídrica irá aumentar, enquanto a disponibilidade de água nos mananciais deverá ser menor e mais concorrida com outros setores. Nesse sentido, é importante que estudos exploratórios sobre os impactos das mudanças climáticas na agricultura de sequeiro e irrigada sejam realizados em todo o mundo, de modo a auxiliar no entendimento do que possivelmente está por vir e, assim, possibilitar a definição de estratégias de mitigação e de políticas públicas que garantam a produção de alimentos, fibras e energia em quantidades suficientes para atender as demandas futuras, mas também garantir a preservação dos recursos hídricos.

Referências

- ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. **Climatic Change**, v.140, p.33-45, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P.R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretária de Biodiversidade e Florestas - SBF, Diretoria de Conservação e Biodiversidade - DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, p.73, 2007.
- ANGELOCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Variabilidade, anomalia e mudança climática**. Piracicaba: Departamento de Engenharia de Biosistemas, 8p., 2007.
- ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe.

- Agricultural and Forest Meteorology**, v.170, p.32–46, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.017>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ARAÚJO, L.F.; OLIVEIRA, N.P.S.; SILVA, R.M.E; BEZERRA, M.A.; ANGELOTTI, F. Influência do aumento do CO₂ no crescimento inicial e nas trocas gasosas do meloeiro amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, p.439-453, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p439-453>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BATTISTI, R. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. 188p., 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 29p., 2020.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; BOOT, K.J.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J.R.B.; BASSO, C.J. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. **European Journal of Agronomy**, v.83, p.1-14, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.004>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BENDER, F.D. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 182p., 2017. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- BENDER, F.D.; SENTELHAS, P.C. Assessment of regional climate change impacts on Brazilian potato tuber yield. **International Journal of Plant Production**, v.14, p.647-661, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00111-7>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BENLLOCH-GONZALEZ, M.; BOCHICCHIO, R.; BERGER, J.; BRAMLEY, H.; PALTA, J.A. High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. **Field Crops Research**, v.165, p.71–79, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.008>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BERKELEY EARTH - GLOBAL TEMPERATURE REPORT. Disponível em: <http://berkeleyearth.org/whats-new-new/?cat=temperature-updates>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- BORGHETTI, J.R.; SILVA, W.L.C.; NOCKO, H.R.; LOYOLA, L.N.; CHIANCA, G.K. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Brasília: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), 226p., 2017.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3, p.512-527, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- COSTA, L.C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L.J.C.; SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, W.P.M.; LEMOS, C.F. Potential forcing of CO₂, technology, and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v.4, p.1-10, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- CUNHA, D.A.; COELHO, A.B.; FÉRES, J.G.; BRAGA, M.J. Effects of climate change on irrigation adoption in Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.36, n.1, p.1-9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i1.15375>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DÖLL, P. Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: A Global Perspective. **Climatic Change**, v.54, p.269–293, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1016124032231>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; MÜLLER, C.; FRIELER, K.; KONZMANN, M.; GERTEN, D.; GLOTTER, M.; FLÖRKE, M.; WADA, Y.; BEST, N.; EISNER, S.; FEKETE, B.M.; FOLBERTH, C.; FOSTER, I.; GOSLING, S.N.; HADDELAND, I.; KHABAROV, N.; LUDWIG, F.; MASAKI, Y.; OLIN, S.;

ROSENZWEIG, C.; RUANE, A.C.; SATOH, Y.; SCHMID, E.; STACKE, T.; TANG, Q.; WISSER, D. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. **PNAS**, v.111, p.3239-3244, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>. Acesso em: 29 mar. 2021.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY/NOAA - Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. ESRL/NOAA. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Acesso em: 05 dez. 2020.

GRAY, S.B.; BRADY, S.M. Plant developmental responses to climate change. **Developmental Biology**, v.419, p.64–77, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>. Acesso em: 29 mar. 2021.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE. In: CLIMATE CHANGE 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 151 p., IPCC, 2014.

JALOTA, S.K.; RAY, S.S.; PANIGRAHY, S. Effects of elevated CO₂ and temperature on productivity of three main cropping systems in Punjab, state of India - A simulation analysis. In: WORKSHOP PROCEEDINGS: IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE, **Anais**, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3, ii. Ahmedabad, 2009.

LEAKEY, A.D.B. Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. **Proceedings of the Royal Society B**, v.276, p.2333-2343, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1517>. Acesso em: 29 mar. 2021.

MARENGO, J.A. Mudanças Climáticas: Detecção e Cenários Futuros para o Brasil até o Final do Século XXI. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.J.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, parte III - Variabilidade Climática, p.407-424, 2009.

MARTINEZ, C.A.; OLIVEIRA, E.A.D.; MELLO, T.R.P.; MARIN, A.L.A. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.8, p.635-650, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p635-650>. Acesso em: 29 mar. 2021.

NECHIFOR, V.; WINNING, M. Global crop output and irrigation water requirements under a changing climate. **Heliyon**, v.5, e01266, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01266>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia - Fundamentos e Aplicações Práticas**. Editora Agropecuária: Guaíra. 470p., 2002.

RAUFF, K.O.; BELLO, R. A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. **Agricultural Sciences**, v.6, p.1098-1105, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/as.2015.69105>. Acesso em: 29 mar. 2021.

REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P.; DIAS, C.G.; YNOUE, R.Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, v.2014, p.1–17, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/376738>. Acesso em: 29 mar. 2021.

RIEDIGER, J.; BRECKLING, B.; NUSKE, R.S.; ROLIM, W.S. Will climate change increase irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study for Northern Germany. **Environmental Sciences Europe**, v.28, p.1-13, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0018-1>. Acesso em: 29 mar. 2021.

ROLIM, J.; TEIXEIRA, J.; CATALÃO, J. Irrigation management of crops rotations in a changing climate. **Geophysical Research Abstracts**, v.14, p.14427, 2012.

SÁNCHEZ, E.; SOLMAN, S.; REMEDIO, A.R.C.; BERBERY, H.; SAMUELSSON, P.; ROCHA, R.P.; MOURÃO, C.; LI, L.; MARENGO, J.; DE CASTRO, M.; JACOB, D. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twenty first century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v.45, p.2193-2212, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2466-0>. Acesso em: 29 mar. 2021.

- SILVA, J.B.L.; FERREIRA, P.A.; PEREIRA, E.G.; COSTA, L.C.; MIRANDA, G.V. Development of experimental structure and influence of high CO₂ concentration in maize crop. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.306–314, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000200010>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.730–740, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300041>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- THOMAS, A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. **Global and Planetary Change**, v.60, p.306-326, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.009>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- TORRES, R.R.; MARENGO, J.A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v.112, p.253–272, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0718-7>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- TRIPATHY, R.; RAY, S.S.; SINGH, A.K. Analyzing the impact of rising temperature and CO₂ on growth and yield of major cereal crops using simulation model. In: WORKSHOP PROCEEDINGS: IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE, **Anais**, ISPRS Archives XXXVIII-8/W3. Ahmedabad, 2009.
- VANAJA, M.; MAHESWARI, M.; JYOTHI, N.L.; SATHISH, P.; YADAV, S.; SALINI, K.; VAGHEERA, P.; VIJAY, G.K.; RAZAK, A. Variability in growth and yield response of maize genotypes at elevated CO₂ concentration. **Advances in Plants & Agriculture Research**, v.2, p.2–5, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00042>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- VERHAGE, F.Y.F.; ANTEN, N.; SENTELHAS, P.C. Carbon dioxide fertilization offsets negative impacts of climate change on Arabica coffee yield in Brazil. **Climatic Change**, v.145, p.1-15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2068-z>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- VIEIRA, J.S. **Impactos da variabilidade e das mudanças climáticas no balanço hídrico climatológico de Piracicaba, SP, no período de 1903 a 2019**. 29p., 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Gestão Ambiental) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 29p., 2020.
- WADA, Y.; WISSER, D.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; HANASAKI, N.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F.T.; STACKE, T.; TESSLER, Z.; SCHEWE J. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. **Geophysical Research Letters**, v.40, p.4626–4632, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/grl.50686>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, v.45, p.1564–1571, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140527>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ZHANG, X.; CAI, X. Climate change impacts on global agricultural water deficit. **Geophysical Research Letters**, v.40, p.1111–1117, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.1002/grl.50279>. Acesso em: 29 mar. 2021.

CAPÍTULO 12

12 MANEJO DA IRRIGAÇÃO NO BRASIL: APLICAÇÕES, DESAFIOS E TENDÊNCIAS PARA O FUTURO

Mirta Teresinha Petry, Reimar Carlesso e Juliano Dalcin Martins

Resumo

A principal questão atribuída à irrigação está relacionada a “quando” e “quanto” de água aplicar. A resposta a essa questão pode ser dada mediante uma adequada programação de irrigação, que requer o conhecimento das necessidades hídricas e a resposta das plantas à água. Uma boa programação de irrigação também deve considerar as restrições específicas de cada método e/ou equipamento de irrigação, as limitações relativas ao sistema de abastecimento de água e as implicações financeiras e econômicas da prática da irrigação. A programação das irrigações envolve uma série de processos e princípios, os quais podem ser baseados em medições da umidade do solo, das condições meteorológicas, do status hídrico da planta e/ou da combinação de um ou mais desses fatores. Quando a umidade do solo for adequada, as plantas transpiram em taxas potenciais, entretanto, à medida que a umidade do solo decresce, há uma redução na transpiração com conseqüente elevação da temperatura do dossel, caracterizando o início do stress hídrico. As plantas apresentam stress quando a umidade do solo é insuficiente para suprir o seu requerimento, em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera. Embora o conceito pareça fácil, a quantificação acurada dos parâmetros que indicam stress, a partir da umidade do solo ou do status hídrico, além dos fatores do sistema solo-planta-atmosfera que afetam o conteúdo de água no solo, são fundamentais para melhorar o manejo da irrigação. Assim, o objetivo desse capítulo é avaliar o estado da arte do manejo da irrigação no Brasil, as aproximações atualmente utilizadas e inovações em curso, como forma de melhorar o suporte à irrigação em nível de produtor.

12.1 Introdução

A agricultura é a maior consumidora de água no mundo, contabilizando em torno de 70% do total de água fresca anualmente retirada de rios, lagos ou águas subterrâneas (WORLD BANK, 2020), e uma parcela de uso ainda maior se considerarmos o chamado uso consuntivo, resultado da evapotranspiração das plantas. Altamente dependente da água e linearmente relacionada aos riscos representados pela ausência dessa, a agricultura tem como desafio unir o crescimento econômico, a saúde humana e a sustentabilidade ambiental, de forma a atender a demanda mundial por alimentos e fibras para uma população que cresce continuamente.

A relação entre irrigação e o aumento de produção de alimentos não é recente (PEREIRA, 2017). Para além da expansão e intensificação das áreas irrigadas, há a necessidade de melhorar a relação entre segurança alimentar e o uso de recursos hídricos, com foco na conservação da água e dos solos, adoção de variedades mais adaptadas às condições locais, redução do uso de energia e modernização dos sistemas de irrigação (HANJRA; QURESHI, 2010). De acordo com Rodrigues *et al.* (2013b), somente 19% das áreas cultivadas no mundo são irrigadas, porém, contribuem com 40% do fornecimento de alimentos, além dos ganhos econômicos associados a atividade. O manejo adequado dos recursos hídricos é fundamental para melhorar a

eficiência do uso da água na agricultura irrigada (CARLESSO *et al.*, 2011). A irrigação em excesso, de forma deficiente ou no momento inadequado pode comprometer a produção e interferir negativamente na produtividade da terra e da água (RODRIGUES *et al.*, 2013a).

O aumento na competição pelo uso da água pelos diferentes setores de produção, aliado a uma crescente escassez de água, requer uma guinada substancial no sentido de aumentar a produtividade da água e da terra, demandando abordagens mais amplas, como uma calendarização da irrigação mais ajustada, visando aproveitar melhor a água das precipitações pluviais, uso de cultivares mais resistentes e de ciclo mais curto, sistemas de cultivo conservacionistas, etc. (RODRIGUES *et al.*, 2013a; PEREIRA, 2017). Entretanto, há muitas controvérsias sobre a premissa de que um aumento na eficiência da água em nível de produtor resulte em economia de água para outros setores (GRAFTON *et al.*, 2018). Assim, a mitigação dos efeitos da escassez de água em nível global deve ser acompanhada por melhorias nas estimativas do requerimento hídrico real da planta, de forma a permitir uma distribuição racional da água, no momento e na quantidade exata requerida pela vegetação. Quantificar o consumo de água de forma mais exata significa melhorar as metodologias existentes e procurar novas alternativas, que permitam avaliações mais precisas (CARLESSO *et al.*, 2009). A solução mais lógica para minimizar o uso de água e realizar uma gestão da irrigação mais ajustada, é ampliar o conhecimento a respeito da ET_c , o que implica necessariamente na obtenção de coeficientes de cultura (K_c) mais precisos. A demanda hídrica pode ser descrita como a quantidade de água que a cultura necessita para alcançar rendimentos ótimos ou potenciais. Assim, o uso da irrigação nos pomares deve ser programado (frequência de irrigação e lâmina de água aplicada), através de conhecimento da exigência da cultura, das condições de solo e clima, de forma a evitar o estresse nas plantas, ao mesmo tempo em seja mantida a produção ideal.

12.2 Requerimento hídrico e o manejo da irrigação

Um dos aspectos chaves para melhorar o manejo da irrigação consiste em melhorar as estimativas do requerimento hídrico das culturas, que é representado pela evapotranspiração da cultura (ET_c) (PÔÇAS *et al.*, 2020). Uma forma prática e largamente aceitável para estimar a ET_c consiste na multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o) por um coeficiente de cultura (K_c), conhecido como o método FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998). A partir do lançamento do Boletim 56 da FAO, o método padrão para a estimativa da ET_o é o Penman-Monteith, representando os efeitos dos fatores meteorológicos sobre uma superfície hipotética de referência, caracterizada por uma superfície gramada, de 12 cm de altura, cobrindo totalmente o solo, mantida em ótimas condições agronômicas e adequadamente irrigadas (ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2015). O coeficiente de cultura (K_c), por sua vez, representa as diferenças físicas e biofísicas entre uma cultura específica e a de referência (PEREIRA *et al.*, 2020; ALLEN *et al.*, 1998), podendo ser associado a ET_o na forma de K_c simples ou através da aproximação do K_c dual.

O consumo de água pelas culturas está associado a demanda evaporativa da atmosfera, à disponibilidade de água no solo e estágio de desenvolvimento. Em geral o consumo mais elevado de água coincide com o período em que a cultura apresenta maiores alturas e índice de área foliar (MARTINS *et al.*, 2013). O consumo hídrico da cultura, dentre outros fatores, depende das características da cultura, como a altura da cultura, a qual afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; a resistência de superfície relativa ao binômio solo-planta, que é afetado pela área foliar (pela fração de cobertura do solo com vegetação, pela idade e condições das folhas, e pela umidade no

perfil do solo; e pelo albedo da superfície da cultura-solo, que é influenciado pela fração de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de água na superfície do solo, que influencia o saldo de radiação disponível à superfície, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evapotranspiração.

O monitoramento e identificação do stress hídrico em plantas é fundamental para otimizar o rendimento das culturas, principalmente naquelas regiões onde a distribuição das chuvas é irregular e/ou a água para irrigação é restrita e cara. Para melhor lidar com as crescentes incertezas sobre a disponibilidade de água para fins de irrigação, o manejo da irrigação, de acordo com DeJonge *et al.* (2015), ou a tomada de decisão sobre o momento de acionar os sistemas de irrigação tem recebido grande atenção por parte de pesquisadores, extensionistas e produtores. Uma adequada programação de irrigação garante o suprimento de água às plantas durante todo o ciclo de desenvolvimento das culturas (GOLDHAMER, 2011). A resposta da planta à irrigação é uma função do estado hídrico da planta, o qual é influenciado pelo conteúdo de água no solo e da habilidade do solo em fornecer água às plantas em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera a qual as plantas estão expostas. Portanto, os critérios usados para programar as irrigações envolvem medições da umidade do solo, das condições atmosféricas (evapotranspiração de referência) ou do status hídrico das plantas (WHITE; RAINE, 2008). Embora a medição do status hídrico da planta seja o critério mais eficaz para engatilhar as irrigações (FERNANDEZ; CUEVAS, 2010), seu uso em culturas anuais é limitado devido ao elevado valor dos instrumentos de medida, e ausência de limites críticos que definam o momento de irrigar (JONES, 2004). Assim, a programação da irrigação com base nas medições do conteúdo e/ou do potencial de água no solo ou parâmetros meteorológicos é muitas vezes utilizada (ALGHORY; YAZAR, 2019). Conseqüentemente, o gerenciamento da irrigação, no futuro, deve envolver uma melhor compreensão dos efeitos do conteúdo de água no solo no desenvolvimento das plantas, seja pela integração de um ou mais métodos de medição do requerimento hídrico das plantas, seja pela incorporação de modelos. E, sobretudo, independente das aproximações utilizadas para programar as irrigações, a informação deve chegar ao produtor de forma prática, eficiente e precisa.

12.3 Programação ou calendarização da irrigação

O manejo sustentável da água de irrigação em nível de produtor (ou da propriedade) inclui o uso de um adequado calendário ou programação de irrigação, ou seja, a definição de quando irrigar e quanta água aplicar (PEREIRA; PAREDES, 2018). Basicamente, a decisão de quando irrigar visa atender o requerimento hídrico das culturas, quando esse não é plenamente atendido pelas precipitações pluviais, levando em consideração as condições meteorológicas do local e características da cultura (tipo, estágio de desenvolvimento e fração de superfície coberta pelo dossel). A lâmina de água ou o quanto irrigar, por outro lado, deve considerar a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água no solo e as características do equipamento de irrigação.

É senso comum que a decisão de quando e quanto irrigar, depende do estágio de desenvolvimento, da idade de planta, do solo e sua capacidade de armazenamento, da capacidade do solo em disponibilizar a água às plantas, da interação solo-planta, sobretudo o sistema radicular e das condições meteorológicas. Uma vez que o requerimento hídrico das culturas tenha sido determinado, utilizar uma programação de irrigação é vital para aumentar a eficiência de uso da água, uma vez que, irrigações abaixo do requerimento hídrico reduzem o rendimento. Irrigações em excesso, levam a um incremento no requerimento de fertilizantes pela cultura, aumentam a ocorrência

de doenças, o custo energético do bombeamento e das perdas de água por escoamento e percolação. Assim, as opções para um manejo mais preciso da irrigação devem ser amparadas em aproximações baseadas no monitoramento do solo, da planta, das condições meteorológicas, do sensoriamento remoto ou da combinação desses.

12.4 Manejo da irrigação baseado no status de água no solo: medida do conteúdo ou da tensão de água no solo

O status de água no solo é geralmente inerente a algum stress no sistema solo-planta-atmosfera. A medição do status de água no solo pode ser dividida em: (i) medição do seu conteúdo ou; (ii) medição da energia de retenção da água no solo (JONES, 2007). De acordo com Irmak *et al.* (2014), a medição do status de água no solo é essencial para estabelecer limites de umidade a partir dos quais a planta é sensibilizada pelo stress e auxiliar o produtor na tomada de decisão de quando irrigar, além de possibilitar o desenvolvimento de novas rotinas de monitoramento em nível de propriedade. Em princípio, a medição da umidade na zona radicular não irá necessitar do cálculo da ET_c , desde que os limites de umidade que engatilham a irrigação sejam corretamente escolhidos (JONES, 2007).

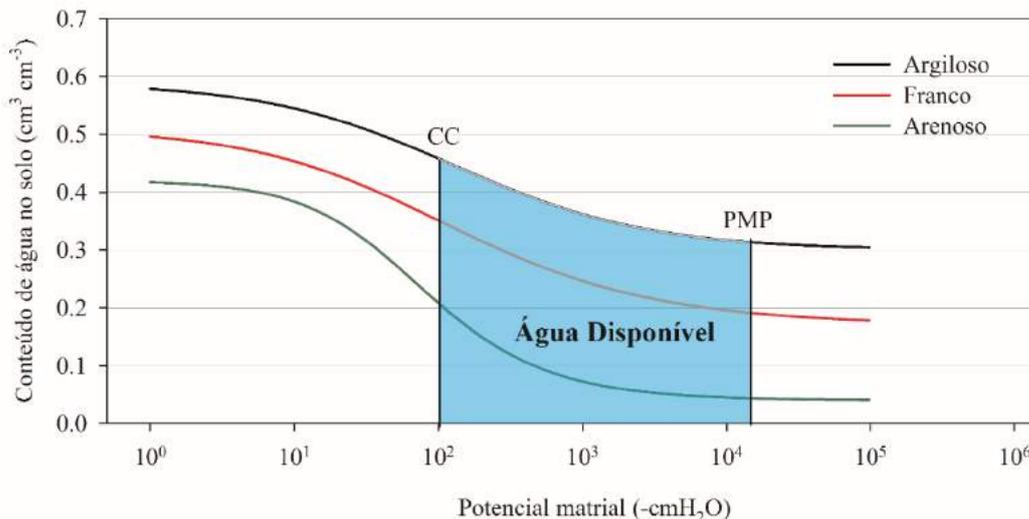


Figura 1. Curvas de retenção de água para solos de textura argilosa, siltosa e arenosa, da umidade de saturação ao ponto de murcha permanente. A umidade entre a capacidade de campo ($\theta_{100\text{ cm}}$) e o ponto de murcha permanente ($\theta_{15000\text{ cm}}$) corresponde a água disponível (área hachurada em azul claro), para as três classes de textura de solo.

Sensores de umidade do solo são inovações recentes na agricultura moderna, com capacidade de medição do conteúdo (θ) ou do potencial de água no solo (Ψ_m), em tempo real. Segundo Jones (2007), há uma extensa gama de sensores ou equipamentos que propiciam medidas diretas ou indiretas do conteúdo de água no solo como a sonda de nêutrons, sensores capacitivos ou eletromagnéticos (reflectometria de domínio de tempo ou de frequência) ou de capacitância. Sensores de medida do potencial de água no solo são dotados de uma cápsula de gesso, a qual é inserida no solo nas profundidades desejadas. Os sensores tipo *Watermark*[®], ora denominados de resistência elétrica, apresentam dois eletrodos inseridos na cápsula. O sensor detecta a variação da umidade ao redor do sensor, a qual é inversamente proporcional a resistência elétrica, ou seja, a resistência entre os dois eletrodos aumenta com a diminuição da umidade do solo. Embora sensivelmente mais baratos que os sensores capacitivos ou eletromagnéticos, esse tipo de sensor requer o conhecimento da curva

de retenção de água no solo para que se possa facilmente associar o potencial medido com o conteúdo de água correspondente aquele potencial.

Na Figura 1 são apresentadas curvas de retenção características de três diferentes texturas de solo, desde a umidade de saturação, até a umidade no ponto de murcha permanente, destacando os limites de água disponível, a partir de um limite superior (θ_{CC}) e inferior de disponibilidade de água no solo (θ_{PMP}).

A principal questão a ser respondida quando se mede o status de água no solo na programação da irrigação é "quais são os limites de umidade que ocasionam o *stress* nas plantas"? As plantas podem apresentar stress em resposta a uma redução na umidade do solo, que acarreta uma redução no potencial de água nas folhas, devido a uma elevada demanda evaporativa da atmosfera ou à combinação de ambos. A maioria dos programas de balanço hídrico do solo (SWB) utilizam como indicadores o *deficit* de água no solo (ALLEN *et al.*, 1998), onde os eventos de irrigação são programados quando a depleção de água na zona radicular das plantas excede a água facilmente disponível (RAW), no decurso de um dia (Equação 1). Essa aproximação exige que as constantes hídricas, como a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (θ_{PWP} , $m^3 m^{-3}$) sejam conhecidas.

$$RAW = p(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \cdot Z_r \quad (1)$$

em que p é a depleção permitida na zona radicular, ou seja, a fração do total de água disponível (TAW) que pode ser esgotada sem que ocorra stress nas plantas, θ_{FC} o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{FC} , $m^3 m^{-3}$), e θ_{PWP} o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PWP} , $m^3 m^{-3}$) e Z_r é a espessura da camada efetivamente ocupada pelas raízes.

Valores de p foram estabelecidos por Doorenbos e Kassam (1979) para milho, soja e algodão (0,6), quando a ETc máxima diária for de 5 mm e de 0.7 quando a ETc for de 4 mm dia⁻¹. Embora corroborados também pelo FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), esses valores em geral não se aplicam satisfatoriamente às condições tropicais e subtropicais no Brasil, pois implicam que o perfil do solo seja homogêneo e sem restrições ao desenvolvimento radicular, o que não ocorre na grande maioria dos solos cultivados no Brasil. Battisti e Sentelhas (2017) simularam o rendimento da soja em diferentes cenários de produção e de profundidade da raiz, encontrando que, um sistema radicular mais profundo resulta em maiores ganhos no rendimento, sendo uma importante estratégia para mitigar os efeitos do *deficit* hídrico no solo. Tipicamente, o sistema radicular da soja é limitado a 60 cm (PIVETTA *et al.*, 2011), não raro estando confinado nos primeiros 30 cm do solo, devido a limitações químicas e físicas (MORAES *et al.*, 2019), ou, eventualmente, questões climáticas (ZANON *et al.*, 2016). Assim, o engatilhamento das irrigações a partir da medição do status de água no solo deve levar em consideração o solo, a cultura e local de produção. Os valores de p (ou da depleção permitida) deve ficar entre 0.25 e 0.4, sobretudo em solos que apresentam restrições ao desenvolvimento radicular e naquelas regiões com elevada demanda evaporativa da atmosfera.

Na Figura 2 (A e B) são apresentados exemplos de um manejo da irrigação usando sensores FDR, modelo CS616 (Campbell Sci, Inc., LOGAN, EUA.). Na Figura 2a, o conteúdo de água no solo foi mantido sempre acima de 90% do total de água disponível (TAW), com sensores colocados nas profundidades de 0,0-10; 10-25; 25-55 e 55-85 cm de profundidade; na Figura 2b, as irrigações eram engatilhadas quando o conteúdo de água no solo atingia valores inferiores a 75% do TAW, em experimentos realizados com a cultura do milho, em condições controladas (no interior de uma *rainout shelter*), na Universidade Federal de Santa Maria, RS. O sistema de irrigação utilizado

foi o gotejamento, com gotejadores autocompensantes, espaçados em 0,5 m entrelinhas e 0.20 m entre gotejadores.

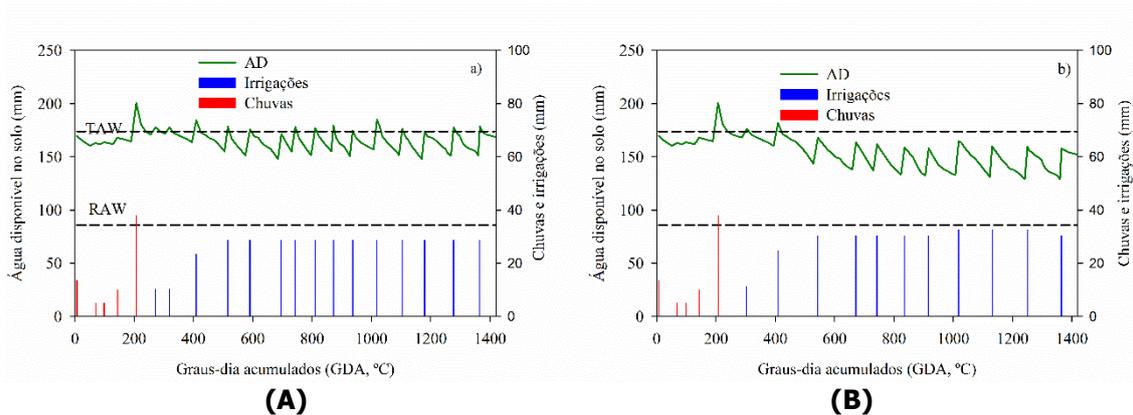


Figura 2. Medição do conteúdo de água no solo em tempo real, utilizando sensores capacitivos (FDR), mantendo a água disponível no solo em 90% do TAW (a) e 75% do TAW (b). Chuvas (barras em vermelho) e irrigações (azul) são apresentadas.

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de monitoramento do potencial de água no solo, em área de pivô central, utilizando sensores de resistência elétrica, tipo *watermark* (modelo 200SS) (Irrometer Co., CA, EUA). Os sensores foram instalados a 10, 30 e 50 cm de profundidade. O engatilamento das irrigações dependerá do tipo de solo, do valor da depleção utilizado, do tipo de cultura e sistema de irrigação. Shock e Wang (2011) apresentam limiares de tensões usadas para iniciar as irrigações, para uma gama de culturas e solos. Limiares entre 60 e 100 kPa são recomendados pela fabricante do sensor *watermark*.

É sabido que o recente avanço nas tecnologias, incluindo a facilidade de automação, dos mais variados sensores tem feito com que a medição do status de água no solo seja um verdadeiro estado da arte no manejo da irrigação. De acordo com Placidi *et al.* (2020), sensores são desenhados para medir e/ou coletar informações, enquanto os microcontroladores com capacidade de rede são programados para interpretar essas informações, para poderem ser incorporados em diversos outros processos. Embora de fundamental importância para melhorar o manejo da irrigação, os sensores de medição do status de água no solo muitas vezes não resultam em um bom manejo da irrigação, fato que pode ser atribuído às incertezas ainda remanescentes acerca da posição e/ou colocação dos sensores no campo, bem como o número de sensores que devem ser utilizados, tendo em vista a variabilidade espacial nas características da maioria dos solos agrícolas.

A posição do sensor, bem como a profundidade de instalação e disposição (na horizontal ou na vertical) depende de fatores como o solo, as características do sistema de irrigação, a profundidade e volume do sistema radicular, entre outros. Especificamente, uma má instalação do sensor resulta em pouca representatividade da medida da umidade do solo (SOULIS *et al.*, 2015), podendo indicar excesso ou deficiência de umidade de forma equivocada. Na Figura 4 é apresentado um esquema de como podem ser instalados os sensores atualmente mais utilizados no monitoramento da umidade do solo.

O posicionamento do sensor e a forma como essa pode afetar a eficiência da irrigação ainda é uma questão a ser respondida na programação da irrigação (SOULIS *et al.*, 2015), entretanto, quando bem instalados e calibrados podem representar significativa economia no uso da água de irrigação. Portanto, o conhecimento do perfil

de umedecimento do solo pela chuva ou irrigação, assim como as características do sistema radicular e seu volume, são parâmetros que devem ser observados na instalação do sensor, para evitar tanto o *deficit* na zona radicular, como o excesso de irrigação.

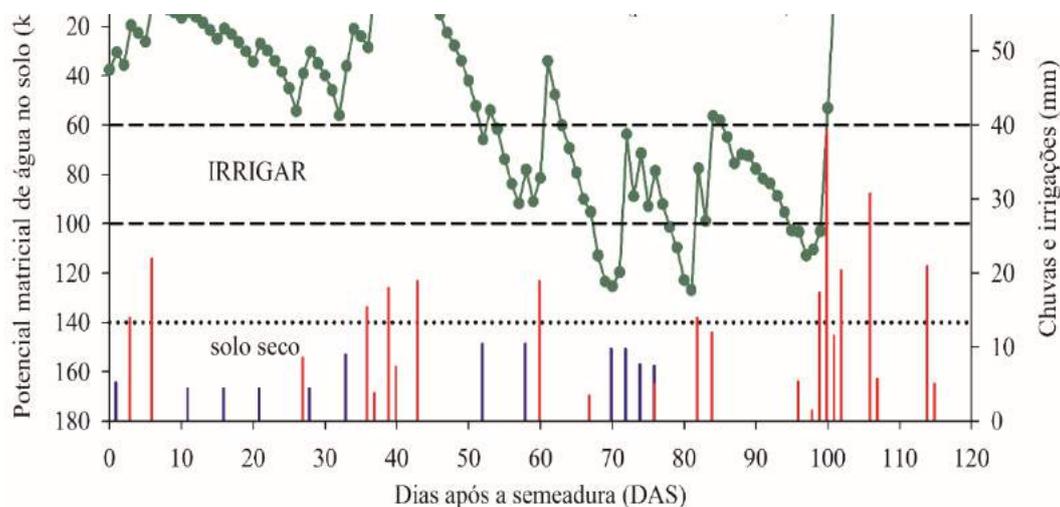


Figura 3. Flutuação do potencial matricial de água no solo (-kPa) durante uma estação de cultivo de milho, com sensores *Watermark* instalados a 10, 30 e 50 cm de profundidade, em área irrigada por pivô central. Barras em azul e vermelho representam as irrigações e precipitações pluviais. As linhas tracejadas (---), referem-se ao limite de potencial considerado como críticos para o início das irrigações, e (....) solo extremamente seco.

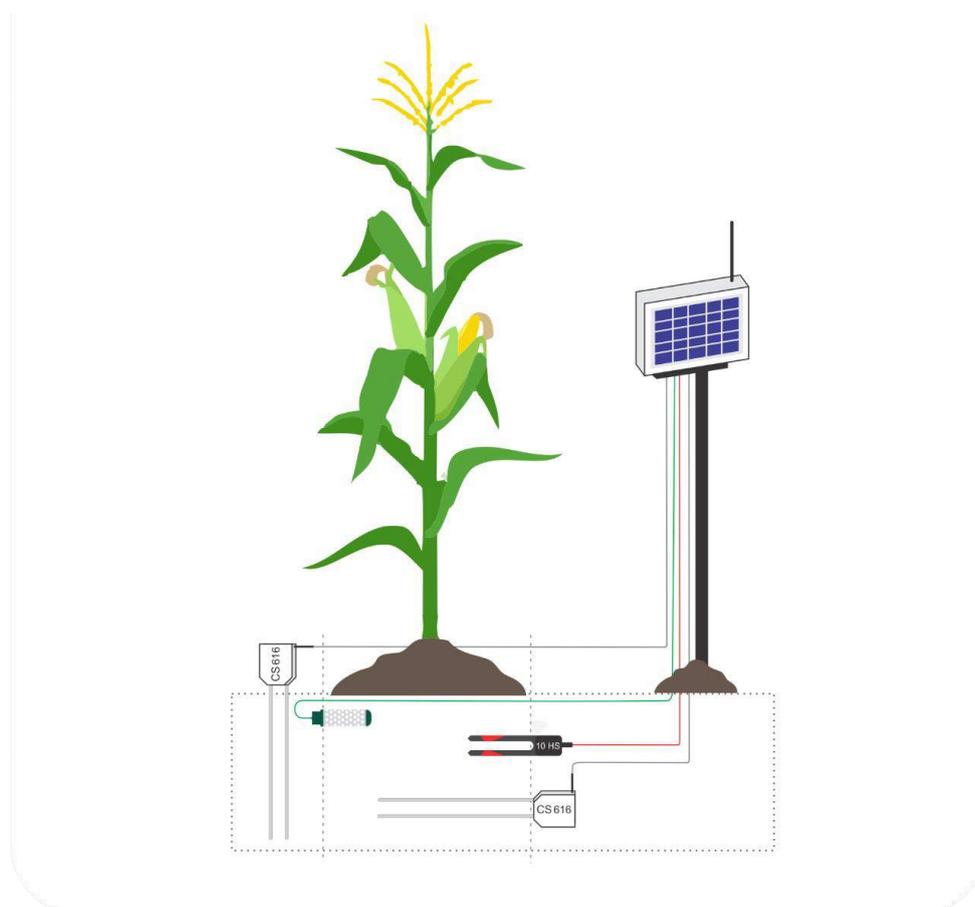


Figura 4. Diferentes tipos de sensores utilizados na medição do conteúdo e do potencial de água no solo e a posição do sensor, em manejo da irrigação de culturas

anuais. Modelo CS616 (Campbel Sci., Inc) e 10 HS (Decagon) são sensores tipo FDR, e o *watermak* (verde) é um sensor de resistência elétrica (Irrrometer).

Os sensores CS616 caracteristicamente apresentem duas hastes inoxidáveis, de 30 cm de comprimento. Quando inseridos na vertical, permitem mapear a umidade no perfil do solo; entretanto, dado que a umidade do solo varia mais em profundidade, maiores variações entre diferentes sensores podem ocorrer. As leituras são mais estáveis quando inseridos na horizontal, porém, para conhecer a lâmina de água armazenada, é necessário associar a espessura da camada que cada sensor representa. Para Soulis *et al.* (2015), uma gama de opções de posicionamento dos sensores é possível, dependendo da acurácia do sensor, devendo-se atentar para a instalação dos sensores, porque a presença de "bolhas de ar" ou a presença de obstáculos (pedras, solo compactado, etc.) no momento da inserção do sensor, podem representar erros maiores que a posição ou o número de sensores utilizados.

12.5 Manejo da irrigação com base na planta: o *status* de água na planta

A resposta da planta à irrigação é uma função do estado hídrico da planta, o qual é influenciado pelo conteúdo de água no solo e da habilidade do solo em fornecer água às plantas em resposta ao ambiente ao qual as plantas estão expostas. Embora a medição do status hídrico da planta seja o critério mais eficaz para engatilhar as irrigações (FERNANDEZ; CUEVAS, 2010), seu uso muitas vezes é limitado devido ao elevado valor dos instrumentos de medida e ausência de limites críticos que definam o momento de irrigar (JONES, 2004). Assim, a programação da irrigação com base nas medições do conteúdo e/ou do potencial de água no solo ou parâmetros meteorológicos é muitas vezes utilizada (ALGHORY; YAZAR, 2019). Entretanto, Akkuzu *et al.* (2013) questionam a utilização desses parâmetros como indicadores da necessidade de água das plantas, pois isso dependeria da condição hídrica da planta.

Medições do potencial hídrico das folhas e caule, assim como a condutância estomática, são indicadores do *deficit* hídrico da planta (JONES, 2004). Entretanto, metodologias ligadas a medição do status hídrico da planta geralmente são trabalhosas e não automatizadas, além de serem destrutivas. Por exemplo, se usarmos o potenciômetro do ponto de orvalho, amostras devem ser coletadas e levadas ao laboratório durante o dia, desde o amanhecer até as horas mais quentes do dia, pois os dados podem ser equivocados se a única amostragem for nas horas mais quentes do dia. Equipamentos portáteis, como o porômetro e o analisador de gás, conhecido como IRGA (*Infra-Red Gas Analyser*) são utilizados para medir simultaneamente a condutância estomática e o potencial de água nas folhas.

Parece claro que a utilização da planta como indicador para o manejo da irrigação se aplica melhor àquelas que não cobrem completamente o solo, como as frutíferas. O potencial de água no caule apresenta ótima relação com o status de água em frutíferas, sendo utilizado para validar medidas automáticas da condutância estomatal, fluxo de seiva (LIVELLARA *et al.*, 2011), temperatura da folha (AKKUZU *et al.*, 2013) e pequenas flutuações no diâmetro de tronco. Todas essas medições requerem instrumentos sofisticados e em grande número, muitas vezes inviabilizando o seu uso (DEJONGE *et al.*, 2015).

A temperatura da folha ou do dossel tem sido reconhecido como um indicador da disponibilidade de água no solo (AKKUZU *et al.*, 2013). A temperatura do dossel aumenta à medida que a planta absorve a radiação solar, porém, é resfriada pelo processo da transpiração quando a umidade do solo atender a demanda da planta (DEJONGE *et al.*, 2015). A temperatura diária do dossel apresenta uma curvatura em

resposta a ocorrência de radiação solar, com temperaturas menores nos extremos do dia. Uma planta estressada reduz a transpiração, elevando a temperatura do dossel, em resposta a uma redução no conteúdo de água no solo. Assim, a temperatura do dossel é reconhecida como um indicador de *deficit*; a temperatura da folha em plantas estressadas é entre 2-4°C acima da temperatura de uma planta não estressada.

Recentemente, metodologias como a termometria de infravermelho têm sido utilizadas para medir o stress de forma não destrutiva, com medições contínuas, podendo serem acoplados a um satélite ou a um veículo aéreo não tripulado (VANT) (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2013), na parte área de um pivô (PETERS; EVETT, 2008) ou posicionados de forma a escanear uma linha de plantas (PÔÇAS *et al.*, 2015). A indicação de quando irrigar, quando se usa a medição da temperatura do dossel, é dada por um índice de stress (IS), que deve ser quantificado para cada cultura e tipo de solo. Todos os IS utilizam como base a temperatura do dossel (T_d); definido por Idso *et al.* (1981), o IS é calculado pela diferença entre a temperatura do dossel e do ar ($T_d - T_a$, °C), respectivamente, ou seja, como sendo uma função do *deficit* de pressão de vapor de água na atmosfera. A temperatura pode ser medida por termômetros infravermelhos portáteis, tipo "*handheld*", para leituras pontuais, ou então fixos dentro do dossel, para monitorar continuamente a temperatura do dossel, desde o amanhecer até o final do dia.

Além de serem utilizados para detectar stress e, conseqüentemente, na criação de calendários de irrigação, os índices de stress também têm sido utilizados para prever o rendimento em uma variedade de condições agroclimáticas (KUMAR *et al.*, 2020). A incerteza na metodologia da definição dos índices de stress está em determinar a temperatura de um dossel em condições de transpiração potencial (quando a umidade do solo estiver adequada) e a temperatura do dossel em condições de stress, ou seja, quando a planta fecha os estômatos em função de uma redução na umidade do solo. Ou seja, também é necessário ter medidas precisas do conteúdo de água no solo, de forma a calibrar adequadamente os índices de stress para diferentes condições de solo, clima e cultura.

O manejo da irrigação através da medição do status de água nas plantas exige que sejam feitos estudos prévios para identificar o momento crítico da aplicação de irrigação, sem ocorrência de redução no crescimento e desenvolvimento das plantas. Uma das principais dificuldades desse método é que existem diferenças varietais com relação à sensibilidade das plantas ao *deficit* hídrico. Além disso, plantas bem irrigadas podem apresentar sintomas de deficiência nas horas mais quentes do dia, por ocasião da ocorrência de altas temperaturas, fazendo com que ocorra uma interpretação equivocada de que esteja ocorrendo deficiência hídrica no solo. Além disso, esse método apresenta baixa precisão e, principalmente, não informa a lâmina de irrigação a ser aplicada, somente o momento de acionar o sistema. Esse método, portanto, não é recomendado para situações onde a obtenção de elevadas produtividades é o objetivo dos agricultores.

12.6 Manejo da irrigação baseado em parâmetros meteorológicos: método da ETC

O correto gerenciamento de irrigação visa prover adequada umidade no solo durante o ciclo desenvolvimento das culturas, no tempo e quantidade apropriada. Os critérios usados para programar as irrigações devem ser baseados em processos e princípios, envolvendo a estimativa da evapotranspiração das culturas (ETC), junto a um balanço hídrico do solo, baseado no status de água no solo e na planta, condições meteorológicas e o status hídrico da planta, através do uso do sensoriamento remoto

ou mediante a combinação de um ou mais processos. Entretanto, as respostas das plantas ao fornecimento de água podem variar em função do estágio de desenvolvimento, da capacidade produtiva dos solos, da região de cultivo, bem como da eficiência dos métodos de irrigação empregados. À medida que a umidade do solo decresce, maior será o impacto das condições meteorológicas sobre o dossel vegetativo, podendo significar o início do stress hídrico nas plantas, quando a reposição de água for insuficiente ou aplicada sem a eficiência desejada.

Desde o surgimento do boletim FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), o método largamente utilizado para estimar o consumo de água de plantas (ou ETC) é através da chamada metodologia de duas etapas (Kc-ETo) (PEREIRA *et al.*, 2015). Na aproximação Kc-ETo, a evapotranspiração de referência (ETo) representa o efeito primário das condições meteorológicas no consumo de água, enquanto o coeficiente de cultivo (Kc) faz o balanço da influência específica das culturas na ETC e sua variação ao longo do ciclo das culturas. Assim, valores padrão de Kc para cada uma das quatro principais etapas do ciclo das culturas (ALLEN *et al.*, 1998) foram providenciadas para um grande número de culturas e larga escala de usos (PEREIRA *et al.*, 2015), visando diminuir as super e subestimativas da ETC.

Segundo a aproximação Kc-ETo, a ETC de uma cultura pode ser estimada sob as mais variadas condições de manejo e desenvolvimento das culturas, considerando influências como as referenciadas por Pereira *et al.* (2015) e Pereira (2017): (i) o estágio de desenvolvimento, quantidade de vegetação e cultivar; (ii) a data de plantio e duração do ciclo; (iii) espaçamentos entrelinhas e plantas, densidade de plantas, altura da cultura e arquitetura do dossel; (iv) a frequência de molhamento pela irrigação ou chuva e sua contribuição para a ETC total; (v) disponibilidade de água no solo e estresse hídrico associado; (vi) ocorrência de salinidade do solo e na água; e (vii) práticas de cultivo não padronizadas e abaixo do ideal. Portanto, práticas de manejo que afetam o desenvolvimento da cultura, assim como a irrigação inadequada, afetam o Kc e, por consequência, a ETC.

Os parâmetros meteorológicos são fatores chaves na estimativa do requerimento hídrico das plantas. As variáveis meteorológicas são representativas de uma extensa área, podendo ser medidas por sensores simples (NAVARRO-HELLÍN *et al.*, 2016), ao passo que, as características de solo e planta variam espacialmente e exigem instrumentação mais rebuscada para a sua medição. Os dados meteorológicos usados para estimar a ETo (mm/dia) (radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e vento) são medidos em estações meteorológicas automáticas. O Brasil possui uma ampla rede pública de estações meteorológicas automáticas e convencionais, cujos dados são disponibilizados para download, de forma gratuita, pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). De acordo com Hunsacker *et al.* (2015), o manejo da irrigação baseado na ETC pode apresentar falhas, como menor reabastecimento de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento, o que resulta em redução no rendimento. Assim, esse método é fortemente atrelado a quatro fatores, segundo Davies e Dukes (2010) e Pereira *et al.* (2015): (i) a acurácia na estimativa da ETo, (ii) um Kc (simples ou dual) calibrado para as condições regionais, (iii) das propriedades do solo, como a retenção e disponibilidade de água, e (iv) medição da chuva em nível de parcela ou área irrigada.

A metodologia FAO-56 Penman-Monteith é recomendada como método padrão de computação da ETo, devido à alta probabilidade de estimativa correta, em uma ampla gama de locais e climas. Assim, a ETo é multiplicada por um Kc para a estimativa diária da ETC (ALLEN *et al.*, 1998). Como a ETo representa aproximadamente todos os aspectos de clima, o Kc varia predominantemente em função das especificidades da

cultura o que possibilita transferir valores e curvas de K_c para diferentes locais e climas (ALLEN *et al.*, 2005a). Assim, a ET_c é facilmente calculada conforme a expressão:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (2)$$

em que ET_c é a evapotranspiração da cultura crescendo em condição de ótima disponibilidade de água; ET_o é a evapotranspiração da cultura de referência (mm dia^{-1}) e K_c é o coeficiente de cultura.

Valores padrão de K_c para quatro principais subperíodos do desenvolvimento de uma gama de culturas é apresentada no FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), entretanto, calibrações regionais, sobretudo dos parâmetros da duração das fases, da cobertura do solo pela vegetação, da altura e população do dossel, etc. As curvas de K_c podem ser melhoradas relacionando o ciclo de desenvolvimento à soma térmica (graus-dia acumulados), como apresentado na Figura 5, o que permite estabelecer a ocorrência da emergência, da máxima cobertura do solo pelo dossel e maturação fisiológica (PEREIRA *et al.*, 2015). Para as chamadas culturas esparsas, como pomares e vinhas, o K_c deve ser estimado a partir do diâmetro da copa, da fração de solo sombreada (que dependerá dos espaçamentos), da presença ou não de resíduos na superfície (ativa ou morta), a qual influenciará a evaporação do solo.

Recentemente, novas metodologias de estimativa da ET_c têm sido propostas, visando estimar separadamente a evaporação do solo (E_s) e a transpiração da cultura (T_c), uma vez que, a água transpirada através dos estômatos é diretamente relacionada à produção, enquanto a E_s é considerada a parte da água perdida ou ineficiente. A estimativa separada dos componentes E_s e T_c pode ser feita através de medidas diretas ou via modelos de simulação do balanço hídrico do solo, ambos significando um desafio à investigação para o futuro, como forma de melhorar as medidas da ET_c e, conseqüente, da gestão da água de irrigação.

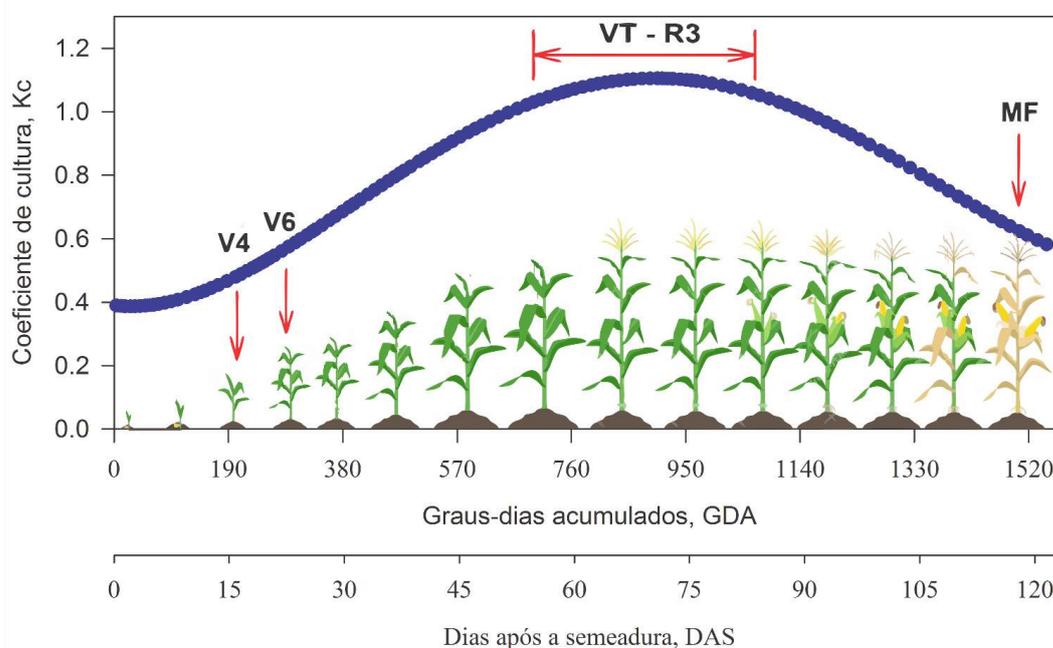


Figura 5. Dinâmica da curva de K_c da cultura do milho irrigado, derivada a partir dos graus-dia acumulados (GDA), através da associação entre o índice de área foliar (IAF), fração de cobertura (f_c) e altura de plantas, durante o ciclo de desenvolvimento.

A computação da ET_c pelo método do K_c simples ainda é a forma mais usada em programas de manejo de irrigação, por incluir em um único coeficiente tanto a transpiração da cultura (T_c) como a evaporação do solo (E_s). Uma curva típica de K_c , quando não há estresse, envolve quatro fases distintas (ALLEN *et al.*, 1998), conforme apresentado na Figura 5: (i) uma fase inicial, compreendendo o período entre a semeadura e 10% do IAF; (ii) uma fase de desenvolvimento rápido, que vai desde os 10% de IAF até a completa cobertura do solo pelo dossel ($IAF > 2.7$); (iii) a fase intermediária, de consumo máximo e; (iv) a fase final, que compreende a fase da senescência e maturação fisiológica.

O manejo da irrigação baseado na ET_c pode ser considerado como um balanço hídrico simplificado, onde o principal componente, a ET_c , é estimada a partir da metodologia K_c - ET_o , conforme especificando anteriormente. Assim, segundo Pereira *et al.* (2015), as irrigações são engatilhadas a partir de uma lâmina de água que pode ser esgotada no solo sem que ocorra stress na cultura a ser irrigada, ou seja, levando-se em consideração a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água no solo, o tipo de solo, a espécie cultivada, o sistema de irrigação, entre outros. O total de água disponível no solo (TAW) é obtido através da equação 3.

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \cdot Z_r \quad (3)$$

em que TAW é o total de água disponível no solo, θ_{FC} é o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{FC} , $m^3 m^{-3}$) e θ_{PWP} é o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PWP} , $m^3 m^{-3}$) e Z_r é a espessura da camada efetivamente ocupada pelas raízes.

Valores de θ_{FC} e θ_{PWP} para diferentes texturas de solo são apresentados na Tabela 3. A depleção permitida na zona radicular das plantas para que não ocorra stress (p), também chamada de RAW ou água facilmente disponível ($RAW = p \cdot TAW$), depende fortemente da capacidade das plantas em extrair do solo, do tipo de solo e das condições de cultivo, sendo afetada por parâmetros comentados na seção 3.1. Na figura 6 é apresentado um desenho esquemático do conteúdo de água na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, para um solo característico do Planalto do Rio Grande do Sul. Parece razoável assumir que θ_{FC} é o limite superior de disponibilidade de água e no solo e, em qualquer umidade abaixo dessa, o stress pode ocorrer. Um valor de p de 0.50 é assumido na maioria dos casos, porém, pode-se assumir valores entre 0.2 a 0.8 (ALLEN *et al.*, 1998).

Na Figura 7 é apresentado um exemplo do manejo de irrigação baseado na ET_c , na cultura do milho, semeado na segunda quinzena de outubro, no RS. O fator de depleção para evitar o *deficit* hídrico (p) foi mantido entre 0.4 e 0.30. Assim, irrigações foram engatilhadas quando a evapotranspiração acumulada (ET_c Ac) atingia o valor da água facilmente disponível (RAW) estabelecido. Uma das questões relacionadas ao manejo via ET_c é quanto irrigar, uma vez que, o recarregamento do solo até a umidade da capacidade de campo aumenta os riscos de perdas de água por percolação (GU *et al.* (2020), sobretudo em regiões onde a irrigação é adotada de forma suplementar. Assim, as lâminas a serem irrigadas deve ser de forma a elevar a umidade até 70 ou 80% da umidade na capacidade de campo.

Tabela 1. Teores de umidade de saturação (θ_{sat}), capacidade de campo ou limite superior de disponibilidade (θ_{FC}), ponto de murcha permanente ou limite inferior de disponibilidade de água (θ_{PWP}) e capacidade de armazenamento de água no solo disponível às plantas (TAW) (Banco de Dados do Sistema Irriga[®]).

Classe de textura	Conteúdo de água no solo			TAW
	θ_{sat} (m^3/m^3)	θ_{FC} (m^3/m^3)	θ_{WP} (m^3/m^3)	$\theta_{FC}-\theta_{PWP}$ (mm/m)
Areia	0,35-0,42	0,12-0,20	0,02-0,06	100-140
Areia franca	0,33-0,47	0,14-0,24	0,04-0,08	100-160
Franco arenoso	0,34-0,51	0,17-0,29	0,04-0,14	130-150
Franco	0,40-0,52	0,23-0,32	0,14-0,19	90-130
Franco siltoso	0,31-0,54	0,22-0,35	0,10-0,19	120-150
Franco argilo arenoso	0,37-0,55	0,22-0,35	0,13-0,22	90-130
Franco argilo siltoso	0,46-0,56	0,28-0,41	0,15-0,21	130-200
Franco argiloso	0,44-0,55	0,26-0,39	0,14-0,20	120-190
Argilo arenoso	0,37-0,55	0,28-0,40	0,18-0,23	100-170
Argilo siltoso	0,47-0,55	0,29-0,43	0,18-0,29	110-140
Argila	0,49-0,59	0,30-0,50	0,22-0,32	80-180
Muito Argiloso	0,49-0,59	0,31-0,52	0,26-0,38	50-140

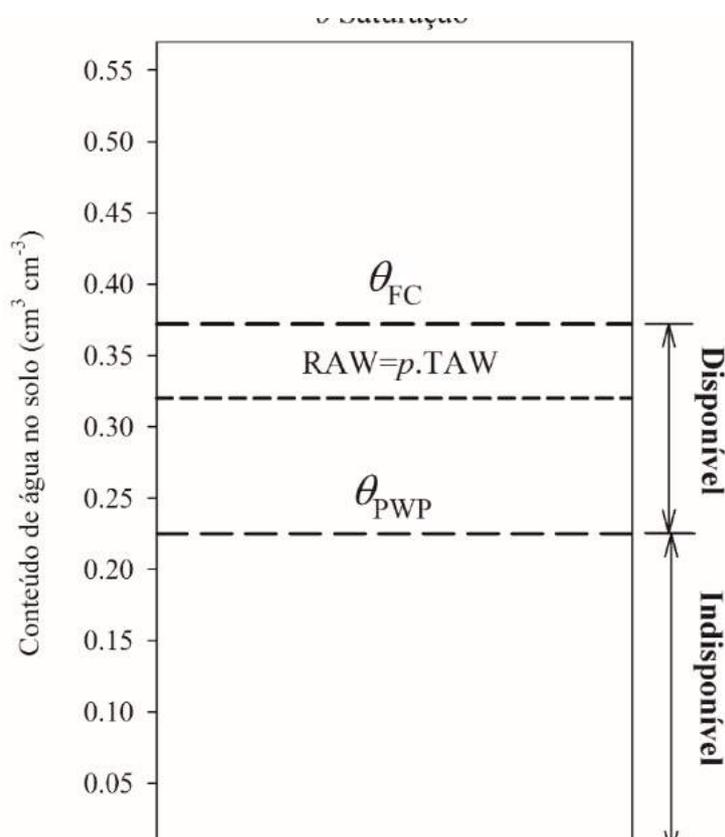


Figura 6. Desenho esquemático do total de água disponível em um perfil de solo, incluindo a umidade de saturação, a lâmina de água na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (mm) e a depleção permitida para que não ocorra stress nas plantas, considerando um p de 0.35.

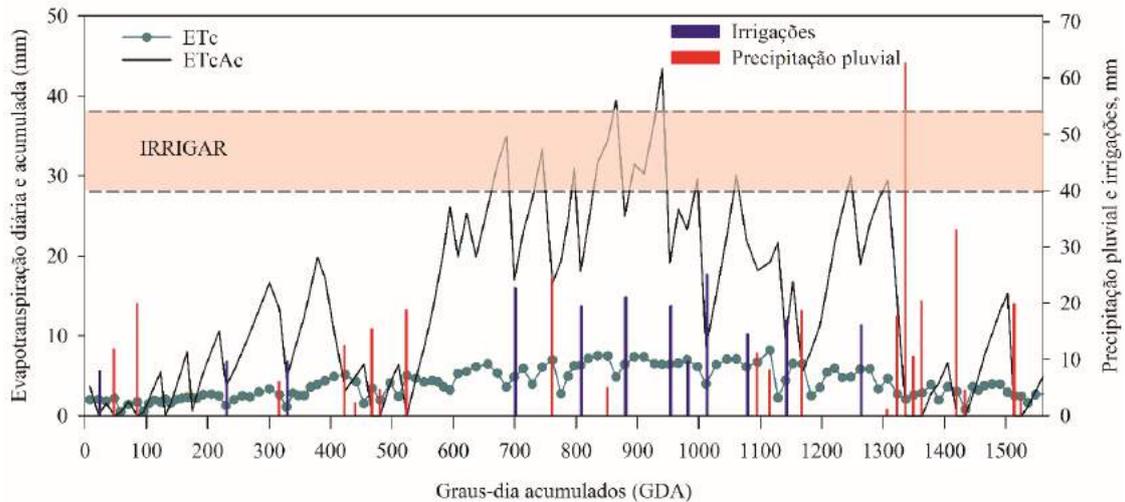


Figura 7. Necessidade de irrigação pelo balanço hídrico meteorológico (ETc), para a cultura do milho, em Santa Maria, RS, para o ano agrícola 2020/21.

12.7 Métodos combinados do manejo da irrigação

Existem diversas metodologias que podem ser utilizadas em nível de produtor para indicar de forma adequada quando e quanto irrigar, para evitar o *deficit* hídrico ou o desperdício de água, por escoamento e percolação. Os fatores que afetam a programação da irrigação incluem a cultura, o estágio de desenvolvimento, as propriedades do solo, as interfaces solo-água-planta e condições meteorológicas. O solo é o meio onde está armazenada a água que é extraída pelas plantas, tendo papel crucial na interação solo-planta-atmosfera. A evapotranspiração das culturas (ETc), por outro lado, é a medida da água extraída do solo pelas plantas, na forma de transpiração das culturas ou evaporada diretamente da superfície do solo, em resposta a uma demanda evaporativa da atmosfera. Consequentemente, a informação da ETc pode ser utilizada no balanço hídrico do solo para programar as irrigações. Assim, medições do conteúdo de água no solo (de forma contínua ou pontual), em combinação com a ETc podem ser combinadas de forma a melhorar a programação das irrigações (Figura 8).

O balanço hídrico combinado consiste em associar medidas do solo, da planta, da ETc, entre outros. Nesse capítulo iremos abordar a combinação de sensores de umidade do solo e dados meteorológicos para fazer o balanço hídrico do solo e programar as irrigações de forma mais precisa. Por esse método, alguns sensores de umidade do solo são utilizados e, concomitantemente, a evapotranspiração da cultura (ETc) é calculada a partir da associação da $ET_o - K_c$. Assim, o balanço hídrico do solo é calculado levando em consideração o total de água disponível (TAW) e a água prontamente disponível (RAW) para cada solo. Posteriormente, calcula-se a ETc diária ($ET_c = ET_o \cdot K_c$) e, mediante um procedimento simples semelhante a uma conta bancária, faz-se o balanço da água que entra no sistema (chuva + irrigação) e das saídas (ETc), até que a RAW seja esgotada. Neste caso, os sensores de umidade servem como um parâmetro de checagem, visando acarrear se, na prática, a estimativa da ETc está refletindo o consumo de água pelas plantas, em cada estágio de desenvolvimento (Figura 8).

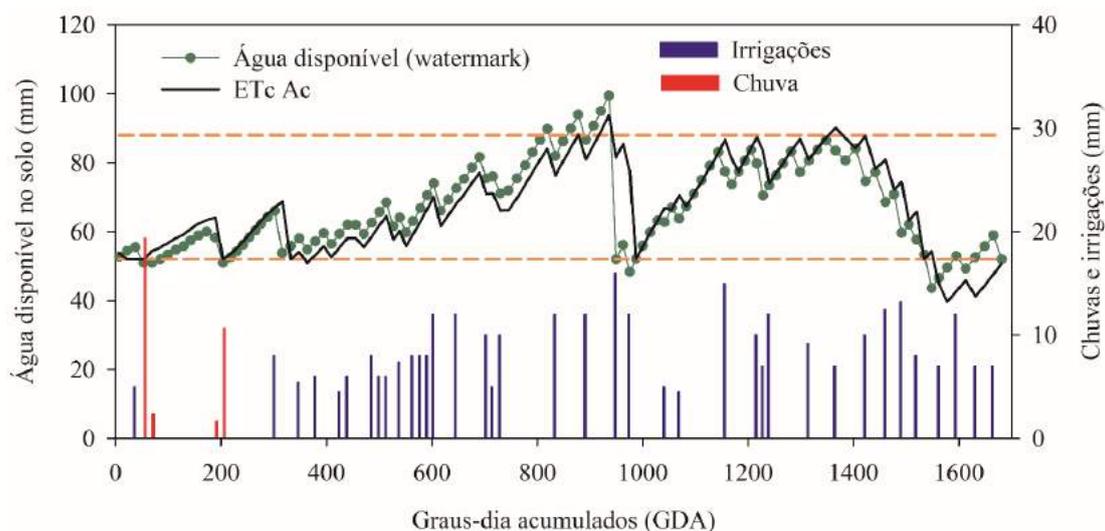


Figura 8. Balanço hídrico combinado (status de água no solo + ETc) para a determinação do momento de irrigar na cultura do milho A ETc (estimada através da metodologia ETo-Kc) e sensores de umidade tipo Watermark são combinados para melhorar a gestão da irrigação.

O balanço hídrico do solo, por sua vez, pode ser calculado por meio de modelos, como o Sistema Irriga® (CARLESSO *et al.*, 2009), ou modelos mais rebuscados, como o SIMDualKc (ROSA *et al.*, 2012), o AquaCrop (STEDUTO *et al.*, 2009), o FAO CROPWAT, o HYDRUS (ŠIMUNEK *et al.*, 2016), entre outros. O SIMDualKc utiliza a aproximação dos coeficientes de cultura duais, onde um coeficiente de cultura de base (Kcb) é ligado à transpiração da cultura e um coeficiente de evaporação (Ke), é utilizado para fracionar a transpiração e a evaporação do solo, tendo sido aplicado para as condições subtropicais do Sul do Brasil por Martins *et al.* (2013), Paredes *et al.* (2018) e Giménez *et al.* (2017), Petry *et al.* (2020) para o milho, tifton e soja, respectivamente.

Sensores de umidade do solo podem ser úteis para indicar o momento de irrigar, em tempo real ou próximo do real, entretanto, precisam ser acompanhados de um sistema de transmissão por telemetria ou chip GPRS (*General Packet Radio Service*), disponibilizados por operadores de telefonia celular, ou a rede LORA (Longe Range), para que o usuário possa acompanhar a situação da umidade no solo do perfil, em tempo real ou quase real.

12.8 Considerações finais

A irrigação é uma prática de manejo que consiste na aplicação artificial de água, visando atender o requerimento hídrico das plantas, de forma integral ou suplementar. A principal questão atribuída à irrigação está relacionada a “quando” e “quanto” de água aplicar em cada uma das áreas. A resposta a essa questão pode ser dada mediante uma adequada programação de irrigação, que requer o conhecimento das necessidades hídricas das plantas e a resposta das plantas à água. Uma boa programação de irrigação também deve envolver as restrições específicas de cada método e/ou equipamento de irrigação, as limitações relativas ao sistema de abastecimento de água e as implicações financeiras e econômicas da prática da irrigação.

Nas últimas décadas, houve uma grande evolução nas metodologias usadas para apropriadamente indicar quando irrigar e quanta água aplicar, sendo que, seu uso deve levar em consideração, os custos, a confiabilidade, o preparo do produtor e da propriedade para gerenciar determinada metodologia, de forma a obter a máxima produtividade. Um bom sistema de manejo da irrigação é aquele que conjuga o melhor

uso da água, com mínimo gasto de energia e máximo retorno líquido ao produtor. Assim, o momento de irrigar e a lâmina de água a irrigar pode ser baseado na evapotranspiração da cultura (ET_c), na medição da umidade do solo, na medição do status hídrico da planta e/ou, de forma mais confiável, na combinação da evapotranspiração com medidas de umidade do solo ou da planta, ou seja, na realização do balanço hídrico do solo, em escala diária.

As metodologias apresentadas para o manejo da irrigação são todas passíveis de aplicar em nível de propriedade quando bem operados. Afora isso, existem atualmente, vários programas de manejo de irrigação que podem auxiliar o produtor na tomada de decisão sobre o acionamento ou não do sistema de irrigação. Sensores inteligentes, usados para monitorar o status de água no solo ou na planta e automaticamente transmitir as informações para um controlador que irá acionar o sistema, necessitam de manutenção periódica, fato que muitas vezes foge ao controle do produtor. Assim, o melhor sistema sempre é aquele que seja fácil e prático de manejar, e que desonere o operador da obrigatoriedade de alimentar o sistema com uma gama de informações muitas vezes distantes do domínio do produtor irrigante.

Referências

AKKUZU, E.; SHENG, Z.; MICHELSEN, A.; RODRIGUEZ, O.; KING, J. Diurnal variation of canopy temperature differences and leaf water potential of field-grown olive (*Olea europaea* L. cv. Memecik) trees. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, n.9, p.728-737. 2013. DOI 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000623.

ALGHORY, A.; YAZAR, A. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. **Irrigation Science**, v.37, p.61-77, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-018-0603-y>. Acesso em: 29 mar. 2021.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, n.56, FAO, Rome, 300 p., 1998.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J.L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, p.2-13, 2005.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Improvement of Soybean Resilience to Drought through Deep Root System in Brazil. **Agronomy Journal**, v.109, p.1612-1622, 2017. DOI 10.2134/agronj2017.01.0023.

CARLESSO, R.; SPOHR, R.B.; ELTZ, F.L.F.; FLORES, C.H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the curve number method. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1020-1026, 2011. DOI 10.1016/j.agwat.2011.01.012.

CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; TROIS, C. The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management. IFIP **Advances in Information and Communication Technology**, v.293, p.19-27, 2009.

DAVIS, S.; DUKES, M. Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. **Agriculture Water Management**, v.98, n.1, p.19-28, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.006>. Acesso em: 29 mar. 2021.

DEJONGE, K.C.; TAGHVAEIAN, S.; TROUT, T.J.; COMAS, L.H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agriculture Water Management**, v.156, p.51-62, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>. Acesso em: 29 mar. 2021.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. In: FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, n.33, Rome, Italy, 133p., 1979.

- FERNANDEZ, J.E.; CUEVAS, M.V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: **A review - Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, n.2, p.135-151, 2010.
- GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of Aquacrop and Simdualkc models. **Water**, v.9, n.6 p.393-411, 2017. DOI 10.3390/w9060393.
- GOLDHAMER, D.A. **Tree water requirements and regulated deficit irrigation**, 2011. Disponível em: <http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/files/73693.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- GRAFTON, R.Q.; WILLIAMS, J.; PERRY, C.J.; MOLLE, F.; RINGLER, C.; STEDUTO, P.; UDALL, B.; WHEELER, S.A.; WANG, Y.; GARRICK, D.; ALLEN, R.G. The paradox of irrigation efficiency. **Science**, v.361, n.6404, p.748-750, 2018. DOI 10.1126/science.aat9314.
- GU, Z.; QI, Z.; BURGHATE, R.; YUAN, S.; JIAO, X.; XU, J. Irrigation Scheduling Approaches and Applications: A Review. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.146, p.04020007, 2020. DOI 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001464.
- HANJRA, M.A.; QURESHI, M.E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food Policy**, v.35, p.365-377, 2010.
- HUNSAKER, D.; FRENCH, A.N.; WALLER, P.M.; BAUTISTA, E.; THORP, K.R.; BRONSON, K.F.; ANDRADE-SANCHEZ, P. Comparison of traditional and ET-based irrigation scheduling of surface-irrigated cotton in the arid southwestern USA. **Agricultural Water Management**, v.159, p.209-224, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.016>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- IDSO, S.; ACKSON, R.J.; PINTER, P.; REGINATO, R.; HATFIELD, J. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agriculture Meteorology**, v.24, p. 45-55, 1981. DOI 10.1016/0002-1571(81)90032-7.
- IRMAK, S.; PAYERO, J.O.; VAN DE WALLE, B.; REES, J.; ZOUBECK, G; MARTINS, D.L.; KRANZ, W.L.; EISENHAEUER, D.E.; LEININGER, D. Principles and operational characteristics of watermark granular matrix sensor to measure soil water status and its practical applications for irrigations management in various soil textures. University of Nebraska, **Extension Publications**. EC783., 2014.
- JABRO, J.D.; STEVENS, W.B.; IVERSEN, W.M.; ALLEN, B.L.; SAINJU, U.M. Irrigation Scheduling Based on Wireless Sensors Output and Soil-Water Characteristic Curve in Two Soils. **Sensors**, v.20, n.1338, p.1-11, 2020. DOI 10.3390/s20051336.
- JONES, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, v.407, p.2427-2436, 2004.
- JONES, H.G. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.119-130, 2007.
- KUMAR, N.; ADELOYE, A.J.; SHANKAR, V.; RUSTUM, R. Neural computing modelling of the crop water stress index. **Agricultural Water Management**, v.239, p.105259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106259>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- LIVELLARA, N.; SAAVEDRA, F.; SALGADO, E. Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. **Agriculture Water Management**, v.98, p.684-690, 2011. DOI 10.1016/j.agwat.2010.11.005.
- MARTINS, J.D.; RODRIGUES, G.C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z.B.; KNIES, A.E.; PETRY, M.T.; PEREIRA, L.S. Dual crop coefficients for full and deficit irrigated maize in southern Brazil: model calibration and validation for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystem Engineering**, v.115, p.291-310, 2013. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016.
- MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; BONETTI, J.A.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at

different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v.10, 1358, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358>. Acesso em: 29 mar. 2021.

NAVARRO-HELLÍN, H.; MARTÍNEZ-DEL-RINCÓN, J.; DOMINGO-MIGUEL, R.; TORRES-SÁNCHEZ, R.; SOTO-VALLES. A decision support system for managing irrigation in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.124, p.121-131, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G.J.; PETRY, M.; SEVERO, P.O.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L.S. Evapotranspiration Partition and Crop Coefficients of Tifton 85 Bermudagrass as Affected by the Frequency of Cuttings. Application of the FAO56 Dual Kc Model. **Water**, v.10, n.5 p.558-578, 2018. DOI 10.3390/w10050558.

PEREIRA, L.S. Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. **Water Resource Management**, v.31, p.2985-2999, 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1664-z.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, p.4-20, 2015.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P. Modelling water use on farms. In: OWEIS, T. Water management for sustainable agriculture. **Burleigh Dodds Science**, p.1-28, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2017.0037.15>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v.108, p.39-51, 2012. DOI 10.1016/j.agwat.2011.08.022.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; MELTON, F.; JONHSON, L.; WANG, T.; LÓPEZ-URREA, R.; CANCELA, J.J.; ALLEN, R. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. **Agricultural Water Management**, v.241, p. 106197, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>. Acesso em: 15 mar. 2021.

PETERS, R.T.; EVETT, S.R. Automation of a Center Pivot Using the Temperature-Time-Threshold Method of Irrigation Scheduling. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, P.286-291, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:3(286)). Acesso em: 29 mar. 2021.

PETRY, M.T.; BASSO, L.J.; CARLESSO, R.; ARMOA, M.S.; HENKES, J.R. Modeling yield, soil water balance, and economic return of soybean under different water deficit levels. **Engenharia Agrícola**, v.40, p.526-535, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p526-535/2020>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PIVETTA, L.A.; CASTOLDI, G.; SANTOS, G.P.; ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and activity as affected by the production system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1547-1554, 2011 DOI 10.1590/S0100-204X2011001100017.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v.20, 3585p., 2020. DOI 10.3390/s20123585.

POÇAS, I.; RODRIGUES, A.; GONÇALVES, S.; COSTA, P.M.; GONÇALVES, I.; PEREIRA, L.S.; CUNHA, M. Predicting Grapevine Water Status Based on Hyperspectral Reflectance Vegetation Indices. **Remote Sensing**, v.7, p.16460-16479, 2015. DOI 10.3390/rs71215835.

RODRIGUES, G.C.; MARTINS, J.D.; SILVA, F.G.; CARLESSO, R.; PEREIRA, L.S. Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes. **Biosystems Engineering**, v.116, p.97-110, 2013b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.001>. Acesso em: 29 mar. 2021.

RODRIGUES, G.C.; PAREDES, P.S.; GONÇALVES, J.M.; ALVES, I.; PEREIRA, L.S. Comparing sprinkler and drip irrigation irrigated systems for full and deficit maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns.

- Agricultural Water Management**, v.126, p.85-96, 2013a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.005>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ROSA, R.D.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G.C.; ALVES, I.; FERNANDO, R.M.; PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agriculture Water Management**, v.10, n.3, p.8-24, 2012.
- SHOCK, C.; WANG, F.X. Soil Water Tension, a Powerful Measurement for Productivity and Stewardship. **Hortscience**, v.46, p.178-185, 2011.
- SIMUMEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.H.; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, 2016. DOI 10.2136/vzj2016.04.0033.
- SOULIS, K.X.; ELMOLOGLOU, S.; DERCAS, N. Investigation the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture-based drip irrigation scheduling systems. **Agricultural Water Management**, v.148, p.258-268, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.015>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v.101; p.426-437, 2009. DOI 10.2134/agronj2008.0139s.
- WHITE, S.; RAINE, S.R. A grower guide to plant-based sensing for irrigation scheduling. National Centre for Engineering in Agriculture Publication, 1001574/6, University of Southern Queensland, Toowoomba, QLD, Australia, 2008.
- WORLD BANK. **Water in Agriculture**. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>. Acesso em: 19 nov.2020.
- ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; GRASSINI, P. Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. **Agronomy Journal**, v.108, p.1447-1454, 2016. DOI 10.2134/agronj2015.0535.
- ZARCO-TEJADA, P.J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; WILLIAMS, L.E.; SUÁREZ, L.; BERNI, J.A.J.; GOLDHAMER, D.; FERERES, E. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. **Remote Sensing of Environment**, v.138, p.38-50, 2013. DOI 10.1016/j.rse.2013.07.024.

CAPÍTULO 13

13 TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA MONITORAMENTO DA IRRIGAÇÃO

Catariny Cabral Aleman, Fernando França da Cunha, Rubens Alves de Oliveira e Roberto Filgueiras

Resumo

Neste capítulo serão abordadas algumas ferramentas e aplicações da Irrigação Digital. Com o advento da Agricultura de Precisão, técnicas para aumentar a eficiência do uso da água em áreas irrigadas tem sido utilizada para garantir melhoria da gestão dos recursos hídricos, economia de energia, mão-de-obra e aumento da produtividade. Dessa forma, é possível auxiliar o irrigante a usar adequadamente água e energia durante a condução do manejo de irrigação. Diversas são as tecnologias que podem ser aplicadas na agricultura irrigada. Dentre elas serão apresentadas o sensoriamento remoto e inteligência artificial no suporte à decisão de irrigação. A partir das informações de imagens de plataformas orbitais, aéreas ou terrestres associadas a aplicação de linguagem de programação e algoritmos é possível automatizar sistemas de irrigação visando a aplicação de água em taxa variável. Isso permite atender a variabilidade espacial das áreas irrigadas com economia dos recursos hídricos, aumento de produtividade e viabilidade econômica do uso da irrigação.

13.1 Introdução

A irrigação digital, ou Irrigação 4.0 herdou este nome da Agricultura digital, e assim como a sua predecessora, reúne um conjunto de tecnologias que auxiliam os empresários rurais irrigantes na otimização das atividades do campo por meio de conectividade, sensoriamento remoto, entre outras ferramentas relativas à tecnologia da informação. Isso inclui programas computacionais e equipamentos que reúnem e analisam dados sobre os cultivos agrícolas, possibilitando a automação e suporte para decisões estratégicas.

A agricultura irrigada passou por diversas evoluções ao longo da sua história. No início, os instrumentos que auxiliavam o trabalho no campo eram rudimentares. As empresas de irrigação não possuíam ferramentas para produzir equipamentos de boa qualidade e o gargalo da agricultura irrigada estava na área de engenharia de irrigação. Com o passar dos anos, as empresas foram incorporando tecnologias em seus produtos e resolvendo, em parte, os problemas de engenharia de irrigação. Assim, o novo gargalo da agricultura irrigada passou a ser o manejo da água e muitas empresas especializadas em gestão de irrigação foram criadas para solucionar esse entrave tecnológico. E agora se apresenta um novo desafio, a irrigação digital.

Na irrigação, o uso de tecnologias 4.0 é a garantia de uma melhor gestão da água de irrigação, mão de obra, energia elétrica e insumos em geral, além de atender à necessidade primária dos agricultores, que seria aumentar a quantidade e melhorar a qualidade dos produtos colhidos. O aumento da produtividade e a melhoria na qualidade aparecem como os principais benefícios quando se adota tecnologias 4.0. É oportuno ressaltar que isto vai ao encontro dos desafios impostos pelo aumento da demanda de alimentos. Com a irrigação 4.0 ou agricultura digital, o empresário rural pode lançar mão de diversas tecnologias que auxiliam nas decisões estratégicas e nas questões operacionais do negócio. Assim, além dos benefícios de aumentar a qualidade e

produtividade agrícola, os sistemas integrados de gestão agrícola podem modernizar, simplificar e otimizar a vida do empresário rural.

Com auxílio de tecnologias, o irrigante consegue medir e entender os erros. Assim, com a irrigação digital, é possível tomar decisões estratégicas capazes de reduzir os desperdícios de insumo. Por meio de equipamentos e sensores conectados, o irrigante consegue mensurar a eficiência operacional e, com isso, fazer modificações que possam otimizar os seus resultados. Sem um sistema informatizado, fica difícil para o irrigante conhecer os fatores causadores de redução de rendimento. Assim, percebe-se que a irrigação digital veio para corrigir problemas que antes eram invisíveis aos seus olhos.

O empresário rural, de maneira progressiva, está se conectando à tecnologia da informação e ao ambiente da agricultura 4.0, adicionando novos sistemas e modificando a forma de gerenciar suas atividades. Até as pequenas e médias propriedades rurais estão buscando a modernização na agricultura. Estas inovações estão trazendo benefícios que garantem melhores resultados e potencializando a rentabilidade das atividades agrícolas.

Nos próximos tópicos deste capítulo, a irrigação digital será apresentada considerando os diferentes usos na agricultura. Serão descritas as aplicações de sensoriamento remoto e inteligência artificial no suporte à decisão de irrigação, bem como sua interação, a fim de apresentar como os dados captados são transformados em informação e aplicados nos cultivos agrícolas. Informações a respeito de projeto de sistemas de irrigação serão contempladas nos assuntos referentes a automação de sistemas de irrigação e aplicação de água em taxa variável. Dessa forma, busca-se com este capítulo disponibilizar aos profissionais da área um material bibliográfico que contenha as peculiaridades da irrigação digital e, que simultaneamente, possua as mais recentes e relevantes tecnologias voltadas ao tema.

13.2 Sensoriamento remoto aplicado à irrigação

A espacialização das condições de cultivo, sobretudo de grandes áreas irrigadas, tem ganhado relevância, uma vez que se precisa aumentar a produtividade dos sistemas de cultivos para atender a demanda crescente de alimentos. O desenvolvimento de novas tecnologias derivadas da digitalização da agricultura, voltadas para o aprimoramento produtivo, tem auxiliado, visto que facilitam o tratamento diferenciado do talhão agrícola, no tempo e por unidade de área. Ademais, a agricultura irrigada faz uso expressivo de recursos hídricos cada vez mais escassos, tanto em termos quantitativos, quanto qualitativos. Logo, o monitoramento da agricultura irrigada é ponto chave na questão do aprimoramento do sistema produtivo e, nesse aspecto, as tecnologias de sensoriamento remoto (SR) se tornam indispensáveis.

O SR pode ser definido como a ciência que permite com que dados sejam adquiridos de uma superfície sem que haja contato direto entre o objeto que capta os dados (sensor) e o alvo, não sendo esses dados necessariamente imagens. Uma das classificações possíveis para a aquisição de dados através de SR é realizada de acordo com o nível em que os sensores estão localizados, ou seja, quanto ao nível de aquisição de dados. Nesse sentido, pode-se estratificar o SR em orbital, aéreo e proximal (terrestre) (Figura 1). O nível de aquisição de dados no sensoriamento remoto, quando os dados são em formato matricial, exerce forte influência no tamanho da área que será monitorada pelo sensor, na resolução espacial, resolução temporal e na escala das imagens captadas. Quanto mais alto estiver um sensor, maior será a superfície imageada e, conseqüentemente, maior será a resolução temporal desse sensor, ou seja,

maior será a frequência do monitoramento sobre determinada superfície. Quando se diminui a altitude, menor será a área coberta, entretanto, maior será a riqueza de detalhes captados pelo sensor, isto é, maior resolução espacial (FLORENZANO, 2011).

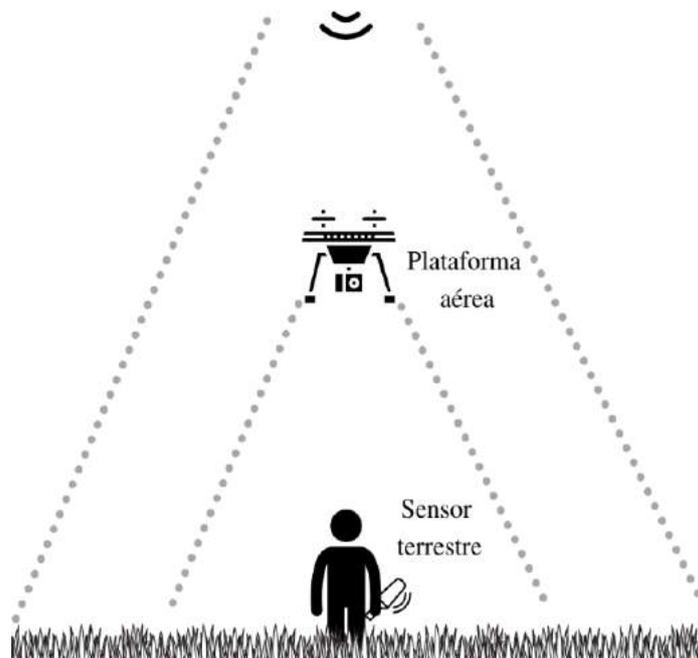


Figura 1. Níveis de obtenção de dados por sensoriamento remoto: orbital, representado pelo satélite; aéreo, representado pela aeronave remotamente pilotada (RPA); e terrestre, representado por um sensor de mão.

A seguir, serão apresentadas as contribuições do SR para a agricultura irrigada nos três níveis de aquisição de dados e, posteriormente, serão apresentados modelos e algoritmos para auxiliar na geração de informação e tomada de decisão.

13.3 Sensoriamento remoto orbital na agricultura irrigada

O sensoriamento remoto orbital concentra-se basicamente no uso de sensores que estão em plataformas orbitais, como satélites, muitos dos quais fornecem imagens gratuitas, sendo possível encontrar um enorme banco de dados históricos. Existem imagens com diferentes características de resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais, as quais tendem a complementar umas às outras nas diferentes aplicações voltadas para o setor agrícola, tais como análises temporais, análises espaciais, expansão das áreas irrigadas, zoneamento agroclimático, estimativa de produtividade, estimativa de evapotranspiração, entre outras.

Uma imagem de satélite tem um papel fundamental no monitoramento de áreas agrícolas, uma vez que o agricultor consegue ter uma percepção global de sua lavoura no que se refere à variabilidade da condição dos cultivos, antes mesmo de se ir ao campo. Essa visão geral traz uma maior efetividade para as inspeções de campo, uma vez que a ida ao talhão pode ser direcionada de acordo com o que foi interpretado na imagem de satélite. No entanto, não são apenas as imagens com resolução espacial a nível de talhão agrícola que auxiliam o agricultor no campo. Existem imagens satelitárias que possuem resolução espacial baixa, mas que fornecem informações importantes a uma resolução temporal elevada, fazendo com que seu uso possa ser adotado em modelos de previsões climáticas e predições de parâmetros como a evapotranspiração.

Os satélites apresentam-se como uma alternativa importante para o monitoramento rápido das lavouras, de maneira sistemática e de baixo custo, uma vez que se tem disponibilidade de imagens gratuitas. Dentre as imagens gratuitas disponíveis, destaca-se para uso na agricultura aquelas dos satélites provenientes da constelação *Landsat* (*Landsat-1*, *Landsat 2*, *Landsat 3*, *Landsat 4*, *Landsat-5*, *Landsat-7*, e *Landsat-8*) e *Sentinel 2* (*Sentinel 2A* e *2B*). Os satélites *Sentinel 2A* e *2B* foram lançados pela *European Space Agency* (ESA), nos dias 23 de junho de 2015 e sete de março de 2017, respectivamente. O sensor *MultiSpectral Imager* (MSI) está presente em ambas as plataformas (*Sentinel 2A* e *2B*), o qual possui uma resolução espacial de 10 metros, na faixa do espectro eletromagnético óptico.

Com intuito de evidenciar a importância do uso do sensoriamento remoto orbital na tomada de decisão em propriedades rurais, será apresentado, a título de exemplo, uma imagem da constelação *PlanetScope*. Portanto, na Figura 2, pode ser observado uma imagem do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) calculado com as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo pertencente a um dos nano satélites da constelação *PlanetScope*. Observando essa imagem, percebe-se diferentes padrões de variabilidade do vigor vegetativo ao longo dos pivôs centrais (círculos), o que por si só, instiga uma inspeção direcionada nos locais onde os cultivos apresentam menor vigor vegetativo (menores valores de NDVI). A inspeção direcionada auxiliará na efetividade do monitoramento das áreas irrigadas, uma vez que o agricultor irá direto nas áreas que devem ser averiguadas, economizando tempo e evitando perdas econômicas.

Com a inspeção localizada, o agricultor buscará entender a real causa do baixo vigor das plantas no local, e buscará soluções para atenuar a possível perda de produtividade. Quando não for possível essa atenuação, o agricultor buscará formas de manejar o local para que se consiga aumentar a rentabilidade dessas áreas menos produtivas.



Figura 2. Imagem do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) calculado com nano satélites da constelação *PlanetLabs*, para uma região composta de pivôs centrais no oeste da Bahia, Brasil.

Apesar de ser difícil identificar a causa de um determinado estresse na cultura apenas observando as imagens, algumas vezes isso é possível. Na maioria das vezes, os padrões espaciais que permitem a identificação de problemas pelas imagens estão associados ao mal funcionamento do sistema de irrigação, uma vez que possuem padrões geométricos específicos. A identificação de problemas nos cultivos agrícolas, sobretudo os irrigados, é um dos potenciais que as imagens provenientes de satélites podem oferecer para auxiliar no monitoramento e no aumento da eficiência dos sistemas de produção irrigados. No entanto, essas tecnologias agregam muitos outros benefícios para o setor da irrigação digital e para a agricultura digital como um todo. O monitoramento com imagens, se bem utilizado no manejo das culturas, pode acarretar melhorias significativas de rentabilidade e produtividade para o setor agrícola. Ademais,

aplicações mais complexas com a utilização de modelos preditivos ainda podem ser empregadas, como será destacado no tópico: 1.4 Modelos e algoritmos para análise de Imagens na agricultura irrigada.

13.4 Sensoriamento remoto aéreo na agricultura irrigada

A partir da segunda década do século XXI é que o sensoriamento remoto aéreo se tornou mais corriqueiro nas propriedades agrícolas, em decorrência da popularização das aeronaves remotamente pilotadas (RPAs). Com isso tornou-se mais comum o uso de câmeras a bordo dessas RPAs para fazer o monitoramento da agricultura, uma vez que as imagens geradas por esses equipamentos não possuem problemas com a presença de nuvens, como ocorre com imagens de sensores orbitais. Essas câmeras são classificadas em dois tipos: modificadas e multiespectrais.

As câmeras modificadas são sensores convencionais (sensores RGB cor natural) alterados com a inserção de um filtro infravermelho, para captar a radiação eletromagnética referente ao comprimento de onda do infravermelho próximo (NIR). A substituição do filtro para a captação da radiação NIR causa interferência na captação de outros comprimentos de onda, o que torna questionável o resultado desses equipamentos. No entanto, as câmeras modificadas se tornaram populares devido ao baixo custo de aquisição quando comparadas com as multiespectrais.

As câmeras multiespectrais, por sua vez, possuem sensores independentes com filtros de alta qualidade para captarem a radiação na amplitude espectral programada em um intervalo estreito de comprimento de onda, tornando os dados adquiridos melhores do que os obtidos nas câmeras modificadas. O fator que mais limita o uso das câmeras multiespectrais ainda é o elevado preço de aquisição.

Existem muitos modelos de câmeras para a realização de monitoramentos agrícolas com RPAs. De modo geral, pode-se destacar as câmeras apresentadas na Tabela 1, por serem mais frequentemente utilizadas. No entanto, cabe destacar a importância que as câmeras que captam a radiação eletromagnética no comprimento de onda do termal possuem para o monitoramento da agricultura irrigada, pois elas permitem estimar a demanda hídrica das culturas com maior precisão e monitorar plantas com estresse hídrico. O dado termal, portanto, fornece informação de grande valia para se proceder com o manejo da agricultura irrigada.

Com o propósito de mostrar o grau de informação espacial que pode ser extraído de imagens captadas de uma RPA, na Figura 3 está apresentado o monitoramento espacial realizado em uma área cultivada com milho, de 2.650 m², até 59 dias após a emergência (DAE). O equipamento utilizado foi uma RPA modelo *Phantom 4*, da empresa *DJI Innovations*. As imagens, em composição RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) cor natural e detalhamento espacial (*Ground Sample Distance*) de 0,025 m, foram adquiridas com o equipamento operando em uma altura de 50 m. Esse nível de detalhamento é relevante quando se busca obter maiores informações da superfície como, por exemplo, verificar problemas que podem estar associados à distribuição de água em talhões irrigados ou, até mesmo, a obstrução de emissores do sistema de irrigação. No caso da Figura 3, as imagens permitem identificar variabilidades na emergência da cultura do milho, presença de plantas daninhas e falhas de plantio.

Tabela 1. Câmeras para monitoramento agrícola utilizando aeronaves remotamente pilotadas.

Câmera	Empresa fabricante	Banda Termal	Classificação
Survey-3	MAPIR	Não	Modificada
Kernel	MAPIR	Não	Multiespectral
Parrot-Sequoia	Parrot	Não	Multiespectral
RedEdge-MX	MicaSense	Não	Multiespectral
Altum	MicaSense	Sim	Multiespectral

A área monitorada é de um experimento agrícola realizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no qual teve-se como objetivo principal estimar a evapotranspiração real e a biomassa da cultura do milho, utilizando uma câmera RGB modificada, modelo *Survey 3*, fabricada pela empresa Mapir. Essa câmera foi denominada na pesquisa de sensor RGNIR, por fazer referência aos espectros do vermelho (*Red*), verde (*Green*) e infravermelho próximo (NIR) que ela passou a captar com a modificação realizada pelo fabricante. Os resultados alcançados em parte dessa pesquisa indicam que é possível realizar o manejo espacial da água e o monitoramento da demanda hídrica na agricultura por meio de sensores RGNIR a bordo de RPAs, sendo cada vez mais factível para pequenas áreas irrigadas. Para detalhamentos referentes a essa pesquisa, sugere-se a publicação de Santos *et al.* (2020). Cabe ressaltar que a evolução de sensores e equipamentos, juntamente com as pesquisas científicas, estão aos poucos inserindo o manejo da irrigação às premissas da agricultura de precisão.

**Figura 3. Acompanhamento espacial de parte do estágio vegetativo da cultura do milho com a utilização de aeronave remotamente pilotada.**

13.5 Sensoriamento remoto proximal na agricultura irrigada

O sensoriamento remoto relativo ao comprimento de onda do infravermelho médio e termal pode auxiliar no entendimento da necessidade de água para as plantas. No que se refere ao infravermelho médio, isso se deve ao fato de a água ser um excelente absorvedor da radiação eletromagnética nesse comprimento de onda e as plantas possuem flutuações na quantidade de água no limbo foliar de acordo com a disponibilidade hídrica no solo. As plantas absorvem água pelo sistema radicular e a conduzem até as células foliares, onde fica armazenada, em grande parte, no mesófilo lacunoso. Logo, se as plantas estão com suprimento adequado de água, seja por chuva ou irrigação, existirá grande quantidade de água no mesófilo lacunoso, o que deixará as folhas túrgidas. O contrário também é verdadeiro, ou seja, caso a planta venha sofrer estresse hídrico, a região do limbo foliar terá uma quantidade de água menor do que a sua capacidade máxima de armazenamento e, por isso, se diz que a planta está em

turgidez relativa. Portanto, se a planta está com as folhas túrgidas, haverá maior absorção de radiação referente ao infravermelho médio, ao passo que plantas com estresse hídrico tenderão a refletir mais energia nesse mesmo comprimento de onda, visto que terão menos água no interior da folha (JENSEN; EPIPHANIO, 2011).

A importância do comprimento de onda relativo ao termal para a agricultura irrigada deve-se ao fato que grande parte da água é perdida por transpiração em forma de vapor nos estômatos. Essa perda tem como um dos propósitos, o de promover o resfriamento no interior do limbo foliar. Logo, quando se tem elevada disponibilidade de água nas folhas, essas tendem a transpirar no seu potencial e por conseguinte, apresentam temperaturas foliares mais amenas. Na situação em que a planta possui pouca disponibilidade hídrica, ocorre o inverso, uma vez que a planta fecha seus estômatos com o propósito de não perder água para o meio, e em consequência, elas elevam a temperatura foliar. Dessa forma, plantas com suprimento hídrico adequado, tendem a apresentar temperaturas foliares mais amenas do que plantas em estresse hídrico, o que refletirá na resposta de instrumentos que captam o comprimento de onda termal (JENSEN; EPIPHANIO, 2011).

Com o conhecimento de que os comprimentos de onda do infravermelho médio e do termal se relacionam com a condição hídrica das plantas, estudos relacionados à necessidade hídrica de plantas com sensoriamento remoto proximal tendem a utilizar dois tipos de sensores, os hiperespectrais e os termais. Os hiperespectrais são utilizados por captarem de forma detalhada informações no infravermelho médio, sendo possível observar os picos de absorção relativos à água no interior das folhas. Apesar do infravermelho médio e termal serem os comprimentos de ondas mais recomendáveis quando o objetivo é avaliar a necessidade hídrica de plantas, existem estudos no meio científico que trazem diferentes combinações de comprimentos de onda e índices de vegetação em investigações que buscam relação com a demanda hídrica das plantas.

Os sensores que captam dados próximos à superfície podem ser montados em dispositivos portáteis, em plataformas terrestres e em maquinário agrícola. Os sensores hiperespectrais mais utilizados no campo, no âmbito de pesquisa, são os espectrorradiômetros da fabricante ASD Inc. (atual Panalytical). Em relação aos sensores termais, as câmeras da fabricante FLIR *systems* têm sido bastante utilizadas.

13.6 Modelos e algoritmos para análise de imagens na agricultura irrigada

O uso de sensores na agricultura permite a coleta de grande número de dados que são usados na modelagem de parâmetros que auxiliam no manejo dos cultivos agrícolas. Assim, técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas para fornecer informações usadas na tomada de decisão no manejo da irrigação, especialmente em grandes áreas.

Existe grande potencial de estimar os coeficientes de cultivo e a demanda hídrica das culturas por meio do uso de imagens obtidas de sensores embarcados em plataformas orbitais e em RPAs. Nesse sentido, é indispensável considerar a espacialização dos dados para se entender cada local específico do cultivo agrícola. Esse fato faz com que as imagens provenientes de sensoriamento remoto sejam de fundamental importância para a entrada de dados em modelos preditivos. Logo, quando o intuito é gerar informação para a agricultura irrigada, é essencial a representação espacial de parâmetros relacionados ao uso da água na agricultura como, por exemplo, a evapotranspiração real.

A evapotranspiração real das culturas pode ser modelada de modo espacial utilizando imagens de satélites e dados meteorológicos. Existem diversas abordagens

para a estimativa desse parâmetro na literatura, sendo comum o uso de modelos baseados na equação residual do balanço de energia e modelos baseados em coeficientes de cultura. Pesquisadores desenvolveram ao longo do tempo, diversos algoritmos e metodologias para obter esse parâmetro por meio de imagens de satélites. Entre os modelos desenvolvidos pode-se citar o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution and Internalized Calibration* (METRIC), *Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop), *Two-Source Energy Balance model* (TSEB), *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER).

Os modelos baseados nos conceitos do balanço de energia estimam o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível. As imagens da constelação Landsat são comumente utilizadas para a estimativa da evapotranspiração por esses modelos; no entanto, outras constelações que possuem a banda termal podem ser utilizadas. De maneira geral, a maioria desses algoritmos leva em consideração as equações do balanço de energia para estimar a evapotranspiração por meio de imagens de satélites.

A grande vantagem da utilização das imagens orbitais é a possibilidade de estimar a evapotranspiração para grandes áreas de modo sistemático ao longo do tempo. Na Figura 4 está apresentada a evapotranspiração real (ETr) estimada pelo algoritmo SAFER, utilizando uma imagem do *Landsat-8*, do dia 28/07/2015, em uma área de agricultura irrigada localizada no oeste da Bahia, Brasil.

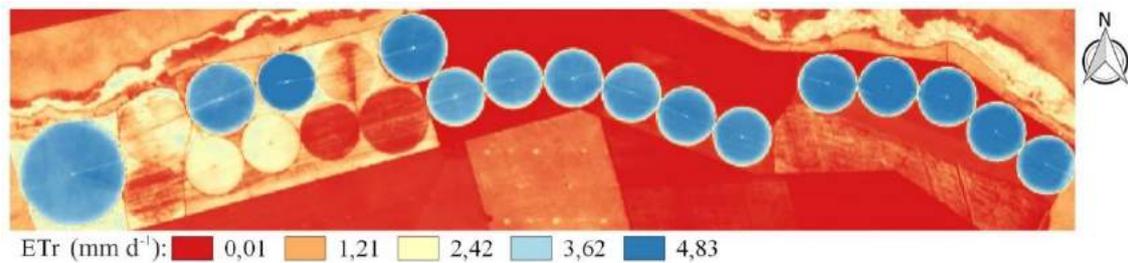


Figura 4. Evapotranspiração real estimada pelo algoritmo SAFER com imagens do satélite Landsat-8.

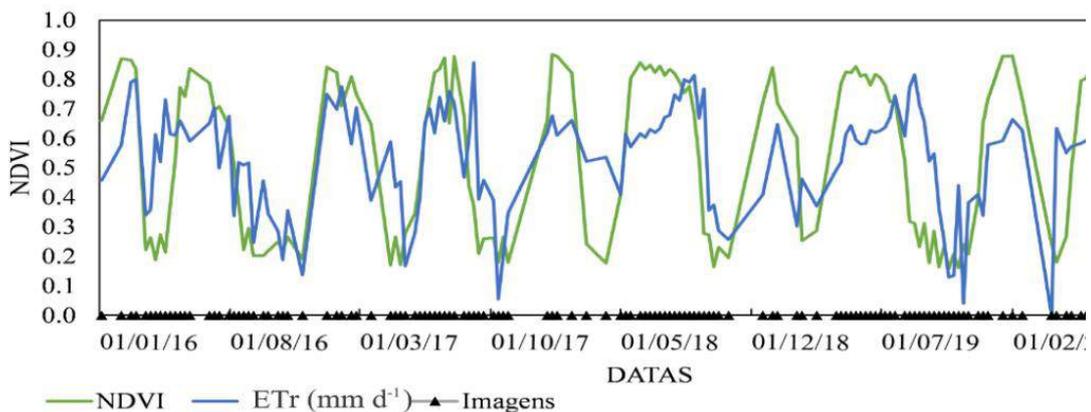


Figura 5. Monitoramento de área irrigada utilizando o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e evapotranspiração real (ETr), adquiridos na plataforma SSEBOP-BR.

Esforços têm sido realizados para haver uma disponibilização de dados, prontos para uso, para o monitoramento e gerenciamento de culturas irrigadas utilizando imagens provenientes da constelação *Landsat*. Um exemplo desse esforço é a plataforma SSEBOP-BR, desenvolvida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento

Básico (ANA), em parceria com *United States Geological Services* (USGS) e a empresa Agrosatélite. A partir dessa plataforma, realizou-se uma análise temporal de janeiro de 2016 a setembro de 2020 para o pivô central delimitado por um círculo preto na Figura 4. Essa análise pode ser observada na Figura 5. Para ter acesso aos dados da plataforma, basta acessar o seguinte endereço eletrônico: <https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebop-br>.

Com a evolução digital, modelos empíricos denominados de *Machine Learning* também estão se tornando comuns e sendo utilizados para previsões com imagens de RPAs e satélites. Essa técnica será abordada no próximo tópico.

13.7 Inteligência artificial aplicada ao manejo de irrigação

O uso de tecnologias de suporte à decisão de irrigação possibilita gerir de maneira inteligente o uso dos recursos hídricos e resulta em aumento da produtividade e do valor econômico das culturas agrícolas.

A irrigação de precisão auxilia no manejo e gestão inteligente da água através de tecnologias de informação e comunicação, desenvolvidas para agregar mais eficiência a processos como a detecção de características edafoclimáticas de uma área agrícola. Inovações em sensores e rede de comunicação de dados sem fio, em conjunto com o avanço de sistemas computacionais e aplicativos móveis, oportunizam o desenvolvimento de ferramentas para o suporte à decisão de irrigação para melhorar o setor produtivo.

Combinar variáveis relacionadas ao solo, ao clima e à planta tem potencial para o manejo adequado e eficiente da irrigação em comparação com práticas tradicionais. O grande desafio na interação entre essas informações está no fluxo de dados, análise e criação de modelos que auxiliem na tomada de decisão. As áreas agrícolas apresentam variabilidade espacial, complexidade nas espécies cultivadas e variações climáticas que devem ser consideradas para a realização da irrigação. Dessa forma, é fundamental a utilização de tecnologias eficientes para auxiliar na gestão hídrica adequada em condições de campo.

A inteligência artificial (AI) é um campo da ciência da computação que agrega aprendizado a máquinas para maximizar a taxa de sucesso ao realizar determinada atividade (JHA *et al.*, 2019). Técnicas de "*Internet of Things*" e *Machine Learning*, como a Lógica Fuzzy e Redes Neurais permitem o aprendizado na AI e auxiliam no desenvolvimento de tecnologias avançadas para o manejo de irrigação. AI relaciona estudos, pesquisa e desenvolvimentos de mecanismos que são semelhantes ao raciocínio humano para perceber um ambiente e aplicar ações com maximização de sucesso.

O *Machine Learning* é a principal forma adotada para implementação da AI. O objetivo é alimentar a máquina com dados de experiências anteriores e estatísticas para executar tarefas para solucionar um problema específico. Ketchum *et al.* (2020) aplicaram o *Machine learning* para identificar áreas irrigadas, de sequeiro, sem cultivos agrícolas e zonas úmidas através de imagens de satélite no Oeste dos Estados Unidos. Esse tipo de sistema permite identificar áreas aptas e inaptas para irrigação, além de permitir o acompanhamento da evolução das áreas irrigadas ao longo do tempo.

O aprendizado de máquina utiliza algoritmos matemáticos atrelados ao domínio do Big Data, possibilitando desenvolver e validar modelos para classificar e analisar áreas para tomadas de decisão. A aplicação dessa técnica permite substituir modelos manuais de gestão da irrigação e viabilizar sistemas automáticos de apoio à irrigação.

Técnicas de aprendizado de máquina podem ser utilizadas para relacionar informações de sensores de solo e estações meteorológicas para prever e recomendar irrigações.

A lógica Fuzzy é um método que auxilia a resolver problemas dentro de um processo. Trata-se de uma técnica que foi desenvolvida para explicar a inteligência humana e o comportamento decisório. Conceitos linguísticos são transformados em conceitos matemáticos e estruturas computacionais permitindo determinar a demanda hídrica de uma cultura, por exemplo. O sistema Fuzzy é baseado em regras base, banco de dados associado a funções que determinam o grau de adesão a uma variável de entrada para o conjunto Fuzzy e, ao final, a combinação de regras produz o resultado do sistema de inferência (Figura 6).



Figura 6. Esquema baseado nas regras Fuzzy (MESQUITA *et al.*, 2016).

Entre as diferentes aplicações da lógica Fuzzy na irrigação, é possível citar a associação de sensores de solo e estações meteorológicas para tomada de decisão durante o processo de manejo da água e o uso em sistemas de irrigação para aplicação em taxa variável em pivô central, utilizando dados do sensoriamento remoto para realização inteligente da irrigação.

O uso inteligente dessa técnica permite a aplicação da lâmina de água de maneira precisa e eficiente através da automação de sistemas de irrigação conectados a sensores que determinam variáveis edafoclimáticas. Informações de sensores de temperatura, umidade e radiação podem ser adotadas como dados de entrada do sistema Fuzzy, tendo como saída o acionamento do sistema de bombeamento de água. Portanto, a lógica Fuzzy correlaciona os dados obtidos nos sensores e gera uma informação que resulta no acionamento do conjunto motobomba do sistema de irrigação.

O uso de rede neurais tem sido incorporado à irrigação para auxiliar na predição e previsão de informações com base no raciocínio paralelo. Basicamente trata-se de modelos matemáticos e computacionais interconectados que funcionam como neurônios humanos. Através de algoritmos é possível correlacionar dados brutos, agrupá-los e classificá-los em *layers* permitindo o reconhecimento de padrões (Figura 7). O número de parâmetros adicionado à rede neural pode ser infinito; entretanto, quanto maior o número de informações, mais complexos são os modelos, maior o tempo de treinamento da rede e maior a tendência de ajustes.

Na rede neural artificial, de forma sintética, é constituída por sinais apresentados na entrada (informações de um sensor). Cada sinal é multiplicado por um peso que indica a influência na saída (variações das leituras do sensor em um intervalo de tempo). É realizada a soma ponderada que fornece um nível de atividade (interferência das informações em um ambiente). Se o nível gerado exceder o limite (*threshold*), determinada resposta é emitida.

O método de redes neurais apresenta elevada habilidade de aprendizado devido à relação não linear entre dados de entrada e de saída do sistema. Entre as aplicações na irrigação e no manejo de recursos hídricos pode-se citar a previsão do conteúdo de água no solo, a demanda de água para irrigação, a modelagem do escoamento superficial e de águas subterrâneas, além da previsão de produtividade das culturas. Essas aplicações permitem que seja estabelecido o suporte à análise de decisão de irrigação de maneira automática ou por meio do técnico responsável pela área irrigada.

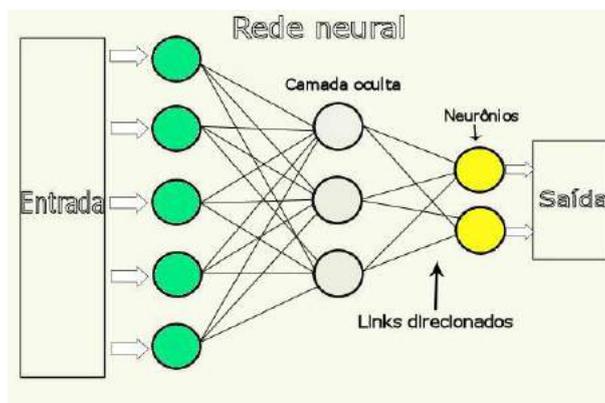


Figura 7. Estrutura de redes neurais (OLIVEIRA, 2011).

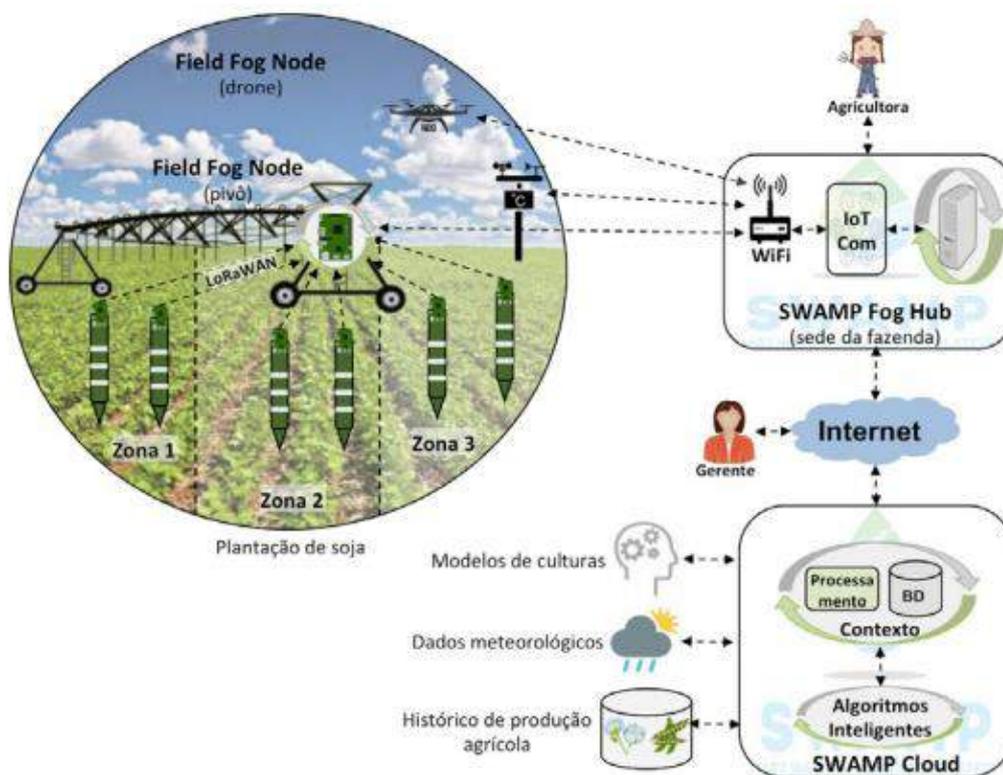


Figura 8. Esquema de funcionamento do SWAMP na gestão inteligente da água para irrigação (KAMIENSKI *et al.*, 2019).

O uso de tecnologias para irrigação de precisão não se restringe ao *Machine Learning*. Diferentes tecnologias de informação e comunicação podem ser utilizadas, entre elas a "Internet of Things" ou "Internet das Coisas" (IoTs). Essa tecnologia inclui uma grande quantidade de sensores, drones, computação em nuvem e *Big Data* interconectados. O objetivo principal é integrar, utilizando algoritmos, todas as

ferramentas e dados disponíveis em plataformas de softwares que permitam a comunicação e adaptação a diferentes cenários.

Existe um grande projeto colaborativo que envolve pesquisadores do Brasil, Espanha e Itália, voltado para desenvolvimento e avaliação de uma plataforma que integra o uso da "Internet of Things". O SWAMP (*Smart Water Management Platform*) é uma plataforma para o manejo inteligente da água que agrega informações em nuvem, tecnologias da informação e algoritmos inteligentes que permitem prever algumas tomadas de decisões em nível local (Figura 8). A plataforma é composta por cinco camadas entre as quais estão serviços de IoTs para o monitoramento da planta, solo e clima, armazenamento virtual, análise de dados, gerenciamento dos dados de água e serviços de aplicação para gerar informação (KAMIENSKI *et al.*, 2019).

O uso de IoT em sistemas e no manejo de irrigação pode aumentar a eficiência e economia de água em projetos, facilitar a integração de atividades como a fertirrigação e otimizar processos de automação. Os sistemas de irrigação inteligentes baseados em IoTs podem conectar informações de disponibilidade hídrica no solo ao acionamento de sistemas de irrigação.

13.8 Automação de sistemas de irrigação

O mercado mundial de irrigação automatizada crescerá cerca de 18,5% ao ano e deve atingir US\$ 6,7 bilhões até 2025 (MARKET AND MARKET, 2020). Isso mostra a conscientização dos irrigantes quanto aos benefícios das tecnologias inteligentes. A automação da irrigação necessita de componentes como controladores, válvulas, sensores, emissores, manômetros, dispositivos de monitoramento e medição de vazão, entre outros. Entretanto, estes componentes necessitam estar integrados em sistemas que combinam tecnologias por meio de conectividade, sensoriamento remoto, entre outras ferramentas relacionadas à tecnologia da informação (TI).

Todos os recursos de TI utilizados na propriedade agrícola possuem a função de coletar e analisar dados sobre solo, planta, atmosfera, relevo, equipamento de irrigação, entre outros. Munido dessas informações, é possível entender as variabilidades existentes dentro das áreas cultivadas e, assim, propor as melhores soluções como aplicação de água em taxa variada, quimigação, entre outras.

Apesar dos produtores rurais estarem aderindo à TI, ainda existem muitos desafios a serem superados, como problemas da conectividade nos países em desenvolvimento. As ferramentas da irrigação digital precisam, em sua maioria, de uma conexão com a internet, recurso escasso em muitas propriedades agrícolas brasileiras. Assim, nota-se uma necessidade de investimento nas operadoras de telefonia móvel para adoção de tecnologias nas fazendas. Para superar esse problema, algumas empresas conectam as máquinas por sinal de rádio emitido a partir de um ponto da propriedade rural. Este ponto está conectado à internet e troca dados móveis via rádio com outros locais da fazenda.

A irrigação digital necessita de tecnologias que agregam funcionalidades para otimizar a produção. O sistema de georreferenciamento associado a outros instrumentos gera muitas possibilidades de aplicação. Como exemplo, o GPS auxilia no sistema de irrigação por pivô central equipado com braço articulado (*corner*). Todo o sistema tecnológico embarcado é programado e controlado por intermédio de um GPS RTK com precisão milimétrica. Isso propicia uma perfeita simetria de abertura e fechamento do braço articulado e dos emissores, conferindo ao *corner* a mesma uniformidade de aplicação de água que o restante do equipamento. O GPS também é utilizado para

saber, de forma remota, em que posição a linha lateral do pivô central se encontra e em qual posição se deseja pará-lo.

Também deve-se considerar que, por meio de uma análise apurada de um número grande de dados (*Big Data*), é possível prever cenários em relação à produção agrícola. Tendo por base casos já observados, diferentes variáveis são utilizadas para prever falhas ou propor alternativas para obter os melhores resultados. O *Big Data* possibilita ainda a coleta e o armazenamento de várias informações dos cultivos agrícolas. Isto viabiliza a criação de um histórico da área que vai garantir a tomada de decisões mais precisas no futuro.

O *Big Data* se relaciona fortemente com o conceito de “Internet das Coisas”, que é o uso de dispositivos e máquinas agrícolas interconectados. Assim, como exemplo, é possível integrar uma rede de sensores sem fio que coletam dados agrônômicos e de umidade do solo, em diferentes subáreas e profundidades, e avaliar a necessidade de irrigação das culturas agrícolas. As informações coletadas são enviadas para uma nuvem computacional, onde são armazenadas e processadas, com o objetivo de otimizar o processo de irrigação e o uso da água na agricultura.

A gestão e o monitoramento remoto da colheita, por telemetria, estão entre as aplicações do *Big Data*. A telemetria refere-se à coleta, ao compartilhamento e à gestão dos dados acerca dos equipamentos e veículos que estão atuando na fazenda, tudo feito de forma remota por meio de ondas de rádio ou sinais de satélite. A conexão envolve um software executado em um computador ou um aplicativo instalado no tablet ou smartphone. Dessa maneira, o usuário visualiza mapa com informações de produtividade agrícola espacializada e tem condições de avaliar os locais que necessitam de melhoria. Por exemplo, pode ocorrer menor produtividade em locais que apresentam solo compactado. Nesses locais, a capacidade de infiltração pode ser reduzida até determinado valor suficiente para provocar escoamento superficial durante um evento de irrigação ou chuva, resultando na infiltração de uma lâmina de água insuficiente para reposição hídrica no solo. Assim, o uso desses mapas possibilita intervenções no campo com o objetivo de evitar problemas no cultivo seguinte.

As informações também podem ser associadas com dados coletados via sensoriamento remoto. Com o monitoramento remoto, o produtor consegue tomar decisões antecipadas, ou seja, identificar o problema a tempo de evitar prejuízo na área cultivada. No exemplo anterior, possivelmente, o vigor vegetativo já estaria comprometido e, por meio de índices de vegetação, o problema já poderia ter sido identificado previamente. Por meio de índices de vegetação, também é possível avaliar a qualidade da irrigação no que se refere à uniformidade de distribuição de água na área cultivada. Assim, após a constatação de variabilidade do índice de vegetação, o irrigante poderá identificar problemas no sistema de irrigação. Isso pode gerar economia de mão de obra e redução nos custos associados a avaliação de sistemas de irrigação.

O sensoriamento remoto também é utilizado para auxiliar na irrigação digital. Com essa técnica pode-se monitorar o status hídrico da área cultivada e decidir o momento de irrigar e a lâmina a ser aplicada em cada subárea. Com estas informações realizam-se irrigações somente em locais específicos e na quantidade correta, e isso pode representar um impacto significativo na economia de água e energia.

13.9 Aplicação de água em taxa variável

O pivô central e o sistema linear são equipamentos versáteis, de fácil operação, que demandam pouca mão de obra para operação e manutenção, além de apresentarem satisfatórias eficiências de aplicação e de distribuição da água de

irrigação. Esses equipamentos são tradicionalmente dimensionados para aplicar a mesma lâmina de água na área irrigada. Assim, não é possível manejar a irrigação com aplicação de lâminas diferentes ao longo do comprimento da linha lateral desses sistemas mecanizados de irrigação. Já no sentido perimetral (pivô central) ou longitudinal (sistema linear), transversal ao percurso da linha lateral, a lâmina de irrigação pode ser variada por meio do controle da velocidade de deslocamento do equipamento. Assim, é possível realizar alguns controles básicos nesses sistemas mecanizados como, por exemplo, aplicar lâminas diferentes em duas metades da área irrigada por um sistema pivô central com distintos cultivos agrícolas.

Diante da necessidade de fornecimento preciso de água de irrigação para os cultivos, foram desenvolvidos pivôs centrais e sistemas lineares com a tecnologia de aplicação de água à taxa variada, conhecida como VRI (*variable rate irrigation*). Por meio de uma combinação de hardware e software, esses sistemas mecanizados de irrigação equipados com VRI individualizam a aplicação de água de irrigação com base em informações espacializadas de chuva, solo, cultura e relevo, entre outras definidas pelo irrigante. A tecnologia VRI permite aplicar a quantidade adequada de água no lugar certo, suspendendo a irrigação em áreas desnecessárias, como em canais, estradas, valas, construções e áreas alagadas.

Além dos benefícios supracitados, os sistemas mecanizados de irrigação equipados com VRI apresentam outras vantagens, podendo-se destacar as seguintes: (i) aumentam a qualidade e produtividade agrícola com menor impacto ambiental, (ii) aplicam irrigação de precisão, reduzindo o consumo de água e energia elétrica, (iii) aumentam a eficiência da aplicação de água e produtos químicos, reduzindo o excesso de irrigação, escoamento superficial, lixiviação de nutrientes e contaminação de cursos de água, e (iv) necessitam de menos manutenções em trilhas e estradas.

No mercado de equipamentos de sistemas de irrigação por pivô central são comercializados dois tipos de VRI. Um é baseado no controle do percentímetro, ou seja, controlando a velocidade de deslocamento do pivô ao longo da sua trajetória radial. Dessa forma, é possível aplicar uma maior ou menor lâmina de irrigação por meio da redução ou aumento da velocidade destes equipamentos, respectivamente. Este VRI é normalmente chamado de VRI controle de velocidade ou VRI setorial. O outro tipo é baseado na variação da vazão dos emissores que equipam o sistema de irrigação. Na literatura são relatadas duas formas principais de irrigar em taxa variada: por meio de emissores pré-configurados para aplicação de determinadas vazões e por pulsos de funcionamento dos emissores, os quais alternam entre um período de tempo em funcionamento ou desligado. Assim, a variação da lâmina bruta de irrigação permite valores contínuos. Independente da forma que a vazão do emissor é variada, o equipamento é chamado de VRI zona.

Como esperado, o VRI zona apresenta maior flexibilidade de variação da lâmina de água na área irrigada, podendo-se dividir a área em um grande número de zonas de irrigação independentes. No caso do VRI zona com controle individual de cada emissor, o detalhamento é ainda maior que o alcançado quando se controla grupos de emissores. Por outro lado, o VRI controle de velocidade permite apenas a variação das lâminas em áreas em formato de fatia de pizza, no caso do pivô central. O padrão de distribuição de irrigação dos dois tipos de VRI são ilustrados na Figura 9.



Figura 9. Áreas irrigadas por equipamentos pivô central dotados de tecnologia de aplicação de água em taxa variada (VRI) (VALLEY IRRIGATION, 2017).

13.10 Considerações finais

As tecnologias digitais, associadas à conectividade no campo, estão modernizando o setor agrário brasileiro e a tendência é que estejam cada vez mais presentes para aperfeiçoar os processos agrícolas, notadamente o manejo da água de irrigação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Educação e Pesquisa da Planet Inc. Por fornecer as imagens PlanetScope (PLANET TEAM, 2017).

Referências

- FLORENZANO, T.G. Iniciação em Sensoriamento Remoto. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 128p., 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Aquastat**: water uses. 2016. Disponível em: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use. Acesso em: 25 nov. 2020.
- JENSEN, J.R.; EIPHANIO, J.C.N. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP. **Parêntese**, 2011.
- JHA, K.; DOSHI, A.; PATEL, P.; SHAH, M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. **Artificial Intelligence in Agriculture**, n.2, p.1-12, 2019.
- KAMIENSKI, C.; SOININEN, J.; TAUMBERGER, M.; DANTAS, R.; TOSCANO, A.; CINOTTI, T.; MAIA, R.F.; NETO, A.T. Smart water management platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture. **Sensors**, v.19, n.276, 2019.
- KETCHUM, D.; JENCOSO, K.; PANETA, M.P.; MELTON, F.; JONES, F.O.; HUNTINGTON, J. IrrMapper: a machine learning approach for high resolution mapping of irrigated agriculture across the Western U.S. **Remote Sensing**, v.12, p.1-23, 2020.
- MARKET AND MARKET. Irrigation Automation Market by System (Automatic, Semi-automatic), Irrigation Type (Sprinkler, Drip, Surface), Automation Type, Component, End-Use (Agricultural, Non-agricultural), and Region - Global Forecast to 2025. 2020. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/>. Acesso em: 28 nov. 2020.
- MESQUITA, M.E.R.V.; DIMURO, G.P.; SANTIAGO, R.H.N.; LAUREANO, E.E. Quarto Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 160p., 2016.

OLIVEIRA, J. **Redes Neurais Artificiais**. 2011. Disponível em: www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/jornal/setembro2011/materias/informatica. Acesso em: 20 nov. 2020.

PLANET TEAM. **Planet Application Program Interface**: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. 2017. Disponível em: api.planet.com. Acesso em: 01 dez. 2020.

SANTOS, R.A.; MANTOVANI, E.C.; FILGUEIRAS, R.; FERNANDES-FILHO, E.I.; SILVA, A.C.B.; VENANCIO, L.P. Actual Evapotranspiration and Biomass of Maize from a Red-Green-Near-Infrared (RGNIR) Sensor on Board an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). **Water**, v.12, n.9, p.2359, 2020.

VALLEY IRRIGATION -VRI-iS. Pivot Prescription Software. **User Guide**, 2017. Disponível em: www.valleyirrigation.com. Acesso em: 26 nov. 2020.

CAPÍTULO 14

14 OS TRANSIENTES HIDRÁULICOS E A AGRICULTURA IRRIGADA

Rodrigo Ribeiro Franco Vieira

Resumo

Por infeliz tradição, dentre outros motivos, a Agricultura Irrigada nunca se preocupou com a correta análise dos transientes, fenômeno que deve ser a base de todo e qualquer projeto hidráulico, e não o regime permanente, como se imaginava e se faz equivocadamente até hoje. Contudo, graças ao desenvolvimento de softwares específicos, este problema agora poderá e deverá pertencer ao passado, cabendo à Academia a sua correta adoção, doravante independente do tempo necessário e dos custos envolvidos pois afinal, corroborando com o saudoso Engenheiro Mecânico Francisco Pachoarelli Veiga (1962-2020), “quem considera que o conhecimento é custo, desconhece o preço da ignorância”. O conhecimento dos transientes hidráulicos, portanto, guindará a agricultura irrigada para outro patamar.

14.1 Introdução

Nas atividades mais simples e corriqueiras do dia a dia sem percebermos estamos sujeitos à dinâmica dos fluidos, a começar pelos nossos sistemas circulatório e respiratório. Isto não se limita às questões biológica, mas também nas atividades cotidianas, desde o despertar até o adormecer, nas quais geramos transientes hidráulicos várias vezes ao longo dia.

Ao nos levantarmos ainda sonolentos, pela manhã, durante a prática das abluções, quando prepararmos o café da manhã, almoço, jantar, ao abrirmos e fecharmos torneiras, chuveiros, e similares, estamos involuntariamente gerando transientes hidráulicos, que ocorrem quando o fluxo é alterado de alguma forma. Contudo, são sistemas tão diminutos e sua magnitude tão irrisória que sequer percebemos algum efeito prático.

A Agricultura Irrigada e a Engenharia de Irrigação são, por definição mais vinculadas à “Área 02” ou às Ciências Biológicas - ou no máximo, à Engenharia Agrícola -, e os cálculos de sistemas de irrigação e adutoras se ativeram sempre ao denominado Regime Permanente, no qual se simula e prevê as vazões e pressões em funcionamento, de modo uniforme, sem maiores interferências no fluxo. No entanto, a não observância, desconhecimento e desprezo ao Regime Transitório podem trazer resultados indesejáveis, tanto na forma de prejuízos materiais, ambientais como até injúrias físicas, fatais inclusive.

Sendo este um tema complexo da hidráulica, cujo estudo, compreensão e soluções requerem um nível elevado de conhecimentos básicos, este capítulo não tem a pretensão esgotar o tema ou o fenômeno que requer cálculos complexos, mas apenas apresentar algumas das principais definições e casos reais da importância de sua consideração, da sua previsão e da adoção das soluções em todos os sistemas hidráulicos projetados. Assim, pretende-se chamar atenção da importância (e ilustrar com exemplos) para a necessidade da consideração e também do aprendizado da análise de transientes, principalmente na agricultura irrigada, onde a sua incidência é de maior magnitude que em outros sistemas hidráulicos. A importância do mesmo não pode deixar que a complexidade cause limitação ao seu uso por parte dos profissionais

de Ciências Agrárias os quais, doravante, deverão passar a prever esta variável em seus projetos ou na operação e solução de problemas ocorrentes nos sistemas hidráulicos sob sua responsabilidade.

14.2 Definição

Regime transitório (ou transiente hidráulico) ocorre quando há qualquer alteração no regime permanente, como por exemplo o fechamento e abertura parcial de registros e válvulas, mudança de diâmetros de redes e adutoras, passagem de fluxo por orifícios dissipadores, partidas e desligamento de bombas, mudanças de nível de reservatórios, ou seja, de tudo aquilo que possa causar alteração no escoamento da tubulação, transformando-o de regime permanente para regime transitório, até atingir outro regime permanente.

Segundo Santos e Castro (2002) "durante o transitório hidráulico as oscilações de pressão ao longo da canalização ocorrem de maneira brusca, provocando ruídos que se assemelham a pancadas. Por isto, o transitório hidráulico também é comumente conhecido como Golpe de Aríete". Assim, qualquer alteração do fluxo gera um transiente hidráulico.

São ondas de pressão que se movem rapidamente ao longo de uma tubulação, causando elevações ou quedas de pressão, podendo ser de grande ou pequena magnitude. Em relação as de pequena magnitude, na maioria dos casos as variações de pressão podem ser desconsideradas, porém vale ressaltar que em determinadas situações sua influência é muito significativa, podendo gerar consequências desastrosas, inclusive pondo em risco vidas humanas" (SANTOS; CASTRO, 2002).

Quando tais variações de pressão possuem grande magnitude (sobre pressões), ocorrem problemas diversos que podem ter caráter imediato ou não, ocorrendo o rompimento após anos de sucessivos golpes que fragilizam as paredes da tubulação. No que tange às subpressões, os valores de tensão (ou "pressão negativa") são inferiores à pressão atmosférica (10,33 m ao nível do mar), pode ocorrer o colapso ou achatamento das canalizações, mesmo as de materiais supostamente resistentes.

Assim, o que caracteriza os transientes hidráulicos é a formação de ondas de sobre e subpressões, distintas daquelas representadas no regime permanente pela conhecida "linha piezométrica". Supondo distintos materiais de tubulações, porém considerando os mesmos diâmetros, vazões e espessuras de parede, tais ondas possuem velocidades relativas a aquelas propagadas pelo som na água (1.498 m s^{-1}), denominadas de celeridade. Em tubulações de ferro fundido e aço (metálicas), esta atinge valores da ordem de 1.100 a 1.450 m s^{-1} ; nas tubulações de PVC, a velocidade é da ordem de 400 a 500 m s^{-1} ; em tubos de PEAD e polipropileno, 170 m s^{-1} ; PEBD, 81 m s^{-1} . Pode-se afirmar, portanto, que quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor a celeridade o que, de forma indireta, pode ser um critério para análise e solução dos transitórios incidentes.

Deve-se ater que tal velocidade é distinta daquela do fluido na tubulação, calculada pela equação da continuidade.

A Equação (1) expressa o cálculo de celeridade ou "velocidade com que a onda de pressão se desloca em uma tubulação" (SOARES, 2012):

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad (1)$$

em que c se refere à celeridade ($m s^{-1}$), D ao diâmetro da tubulação (m), e à espessura de parede da tubulação (m) e k ao coeficiente de elasticidade do material.

A Tabela 1 a seguir apresenta valores de “ k ” para diversos materiais em redes adutoras.

Tabela 1. Valores dos coeficientes de elasticidade para diferentes materiais

Material	Valor de “ k ”	Material	Valor de “ k ”
Aço	0,5	PEAD	111
Cobre	0,8	PEDB	500
Concreto armado	5	Polipropileno	125
FF	1	PVC	18

Na hidráulica básica, além das variáveis perda de carga, vazão, pressão (piezométrica), celeridade, incluem-se outros itens os quais são largamente utilizados, principalmente na área da agricultura irrigada como se fora o estudo de transientes, pois são princípios aplicados através do método de Allievi, que se restringem ao fechamento abrupto de válvulas e registros e que não podem ser considerados como tal, mesmo que possa haver alguma interação. Há autores que o chamam de “Método Simplificado de Análise”.

Segundo Francisco Paschoarelli Veiga:

Métodos Simplificados de Análise consistem em determinar a fase ou período da tubulação, que é o tempo de deflexão das ondas de choque, e a partir disso definem-se as manobras rápidas ou lentas com os dispositivos na tubulação. Manobras rápidas são aquelas que ocorrem em tempo menor que a fase da tubulação e manobras lentas as que ocorrem em tempo maior. Tendo feito isto, utiliza-se a equação de Allievi e de Michaud para as manobras rápidas e lentas, respectivamente, que são utilizadas para o cálculo da máxima sobrepressão. A análise e a medição dos transientes são essenciais para o projeto e operação dos sistemas, a complexidade dela reside na necessidade de, em cada instante do regime transitório, ter em consideração a interação das ondas elásticas de pressão com todos os componentes ou elementos da instalação (VEIGA, *apud* LEGNER, 2017, p.5).

- Período da canalização (t) – Tempo que uma onda leva para ir de uma extremidade à outra de determinada canalização;
- Tipos de manobras – Manobras lenta e rápida, quando são menores ou maiores que o período, respectivamente; e,
- Cálculo da sobrepressão – Pressão adicional a mais ou a menos somada à pressão estática, em função do tipo de manobra.

As Equações (2), (3) e (4) representam tais elementos, restritos ao fechamento (manobra) de redes, jamais para estudo de transientes.

$$\text{Período (s)} - \zeta = \frac{2L}{c} \quad (2)$$

em que L se refere ao comprimento da tubulação (m), c à celeridade ($m s^{-1}$).

Sobrepressão (mca) - Manobra Rápida – ($t < \zeta$):

$$ha = \frac{cV}{g} \quad (3)$$

em que c se refere à celeridade ($m s^{-1}$), V à velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$), e g à aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

Sobrepessão (mca) - Manobra Lenta – ($t > \zeta$):

$$ha = \frac{2LV}{gt} \quad (4)$$

em que c se refere à celeridade ($m s^{-1}$), V à velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$), e g à aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

A análise, quantificação e solução dos efeitos transitórios, contudo, vai muito além da simples determinação da celeridade, período, manobras e sobre-pressões.

Projetos de adutoras, seja para a Agricultura Irrigada ou sistemas de abastecimento devem ser previstos para suportar as condições normais de escoamento e, principalmente, prever os efeitos transitórios e buscar as soluções para arrefecer as pressões excessivas e reduzidas daí advindas, o que exige a correta análise deste fenômeno.

Alguns dos métodos existentes para a análise dos transientes são: (i) método Aritmético: o mais simples dos métodos de análise, que não considera, por exemplo as perdas de carga. Trabalha com aproximações; (ii) método gráfico: sua utilização exige algumas simplificações, e pode ter sua precisão afetada; (iii) método das características: bastante utilizado e matematicamente mais adequado e preciso, e exige softwares sofisticados para o seu emprego. É o método mais recomendado pelos grandes nomes da matéria; e (iv) método algébrico: analisa as ondas de pressão nos sentidos positivo e negativo da tubulação. Pode resolver problemas simples com meras calculadoras manuais.

Há ainda os métodos da Análise Linear, Implícito e os já citados métodos simplificados.

Segundo Santos e Castro (2002, p.2):

A análise do Golpe de Aríete nos sistemas hidráulicos é baseada na equação da continuidade e na equação da quantidade de movimento. Essas duas equações formam um sistema de equações diferenciais cuja solução exata não está disponível, sendo necessário utilizar técnicas específicas para se determinar uma solução aproximada do problema. Desse modo, foram criados diferentes métodos gráficos e analíticos, baseados em diferentes suposições restritivas. Esses métodos, até pouco tempo os únicos disponíveis, são pouco precisos e difíceis de serem aplicados a sistemas complexos. Apesar dos fenômenos transitórios serem conhecidos desde o início do século, foi somente recentemente, com o surgimento e aperfeiçoamento dos computadores digitais, que estes fenômenos puderam ser estudados mais detalhadamente, sem a necessidade de simplificações grosseiras, sendo estes, hoje em dia, ferramentas indispensáveis no dimensionamento de sistemas hidráulicos. estudo do Golpe de Aríete requer o conhecimento das condições iniciais do regime permanente e das condições de contorno da instalação, que são os pontos onde ocorrem descontinuidades das grandezas físicas, como pressão e velocidade de escoamento. Como é um fenômeno complexo,

geralmente é muito pouco discutido nos cursos de graduação, principalmente devido à falta de divulgação e ensino da metodologia numérica apropriada.

As Equações de Quantidade de Movimento (5) e Conservação de Massa (6) representam as bases do cálculo dos transientes, através do método das características, o mais adequado e adotado em todo o planeta até o momento.

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f}{2} \frac{Q}{g D A^2} \frac{|Q|}{A} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{a^2}{g A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

em que H se refere à carga piezométrica (mca); x à distância entre duas seções da tubulação (m), Q à Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); t ao intervalo de tempo (s); g à aceleração da Gravidade (m s^{-2}), A à área da tubulação (m^2); f ao coeficiente de atrito (Colebrook) e a à Celeridade (m s^{-1}).

De uma forma bastante simplificada, haja vista que este capítulo visa apenas alertar para a importância e necessidade de se verificar o fenômeno inclusive na agricultura irrigada, pode-se dizer que

o transiente é calculado em um plano xt, onde x (abscissa) é o comprimento da tubulação e t o tempo. O método das características realiza a integração dessas duas equações diferenciais parciais não lineares ao longo de todo eixo x para cada passo de tempo (delta t). São conhecidos os valores das variáveis no instante inicial ($t=0$, regime permanente) em todas as seções da tubulação. Em $t=1$ são conhecidos Q e H nas seções de extremidade da tubulação e o método calcula essas variáveis para as seções interiores para esse tempo $t=1$. (informação pessoal¹).

Muitas vezes a análise dos transientes para o engenheiro é mais importante do que as condições relativas ao regime permanente, pois não raro há manobras bruscas de registros, falta de energia no sistema de bombeamento, alterando a taxa de variação da vazão rapidamente. Tais distúrbios podem criar ondas de pressão que se deslocam com grande magnitude (celeridade). As tubulações devem ser dimensionadas para resistir a estas cargas adicionais (sobre e subpressões) baseados nas suas classes de pressão ("*pressure ratings*"), que definem a resistência mecânica destes, influenciando deveras nos custos dos investimentos.

Percebe-se, portanto, a complexidade do tema, ficando o seu pleno conhecimento e sua resolução restrita a poucos profissionais, após cursos específicos e de grande carga horária, não obstante os programas existentes facilitarem o seu entendimento e a solução de problemas em casos menos complexos. Para grandes sistemas, ou naqueles que não podem sofrer descontinuidade, é necessária a contratação de profissional qualificado.

14.3 Ondas de pressão

A Figura 1 se refere a uma representação gráfica de uma onda de pressão clássica.

¹ Eng. Marcelo Cardim de Carvalho. Mensagem por whatsapp.

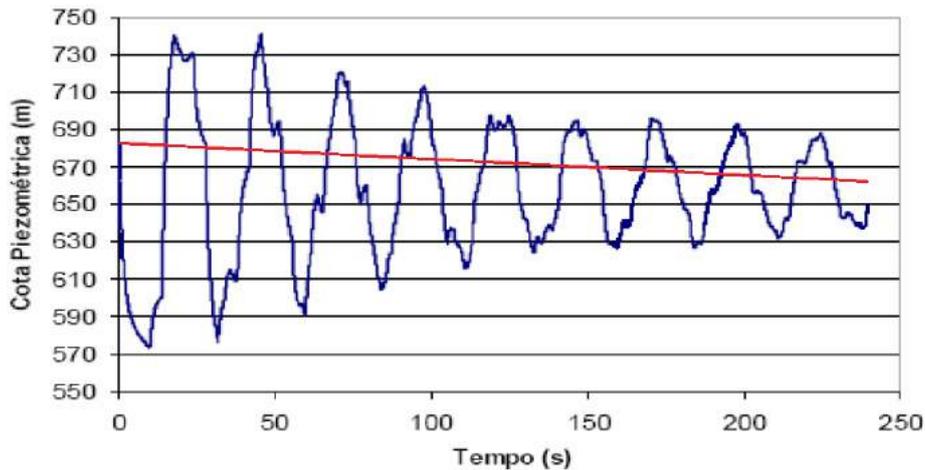


Figura 1. Representação Gráfica de Onda de Pressão (HIDRO-AMBIENTAL, s.d.)

A Figura 1 representa uma onda de pressão com seus picos superiores e inferiores, que nos estudos de transientes formam as envoltórias de máxima e mínima, respectivamente. Estas são relativas à linha piezométrica, representada em vermelho (ilustrativamente), e pertinente ao regime permanente.

Assim, a linha em vermelho representa as pressões na rede quando em operação, ao passo a linha em azul representa as envoltórias geradas pelo golpe de aríete ou transientes hidráulicos, advindos de manobras inadequadas ou falta de energia na elevatória em um único e determinado ponto da rede ao longo do tempo.

A Figura 2 exemplifica os danos causados por transientes hidráulicos em redes e equipamentos.

O mais recente evento provavelmente advindo de efeito transitório, ainda em fase de investigação (outubro/2020), foi o da adutora da hidroelétrica da Barragem do Jati, Ceará, pertencente ao complexo do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF), que trata da transposição de bacias com água advinda daquele manancial. Neste, uma manobra inadequada de um registro poderia ter gerado uma sobrepressão a qual levou ao seu rompimento, por sorte sem maiores consequências físicas, mas acarretando prejuízos financeiros de grande monta, como mostram as imagens da Figura 3.

Além de danos materiais, a desintegração de equipamentos e rompimento de vias pode causar fatalidades, pelas quais os engenheiros responsáveis podem, além de civilmente, criminalmente acusados, na forma da Lei, haja vista que os Conselhos Profissionais, associações e sindicatos de modo geral são muito eficientes nas cobranças, mas pífios para auxiliar e socorrer os profissionais em suas aflições.

Caso o relatório oficial conclua que foi devido a efeitos transitórios, as opções para a sua correção estão facilmente disponíveis, e dependerão de estudos específicos.

Todas as ondas relativas aos transientes ocorrem gerando sobre e subpressões, porém o seu comportamento inicial irá depender da topografia e do acionamento da rede.

O caso mais comum, inclusive na Agricultura Irrigada é quando de um manancial qualquer a água é pressurizada, ou recalçada, para cotas mais altas e/ou à distância, exigindo a aplicação de bombas hidráulicas. Quando do fechamento brusco do registro ou falta de energia, desligando a bomba de súbito, o comportamento da onda é

expresso na Figura 4, com as devidas explicações por etapas, para facilitar a sua compreensão.



Figura 2. Distintos problemas em tubulações adutoras em função de problemas relacionados aos transientes hidráulicos.



Figura 3. Detalhes do rompimento da adutora da hidroelétrica da Barragem do Jati, Ceará, Projeto de Integração do Rio São Francisco

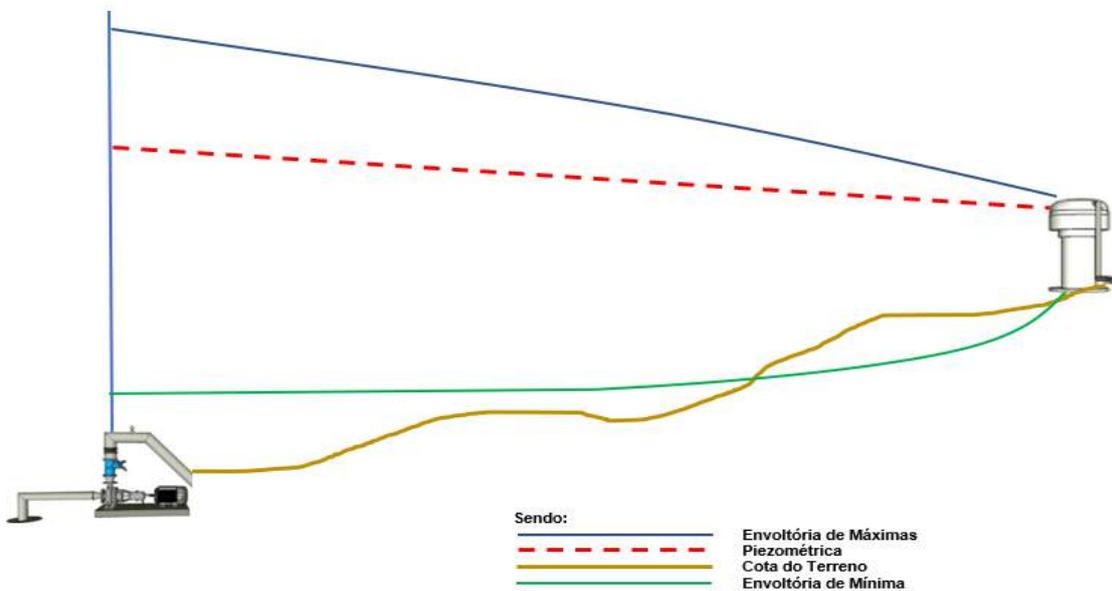


Figura 4. Representação gráfica clássica de onda de pressão: (i) elevatória (EB) em operação normal, com a pressão nos pontos representada pela linha piezométrica (vermelha tracejada); (ii) após parada súbita da EB, o líquido continua a fluir por determinado tempo, causando em primeiro lugar uma onda de sub-pressão (ou depressão, abaixo do valor da piezométrica naquele ponto); e (iii) após a onda de sub-pressão, ocorre outra de sobrepressão, e assim sucessivamente até a parada total do sistema.

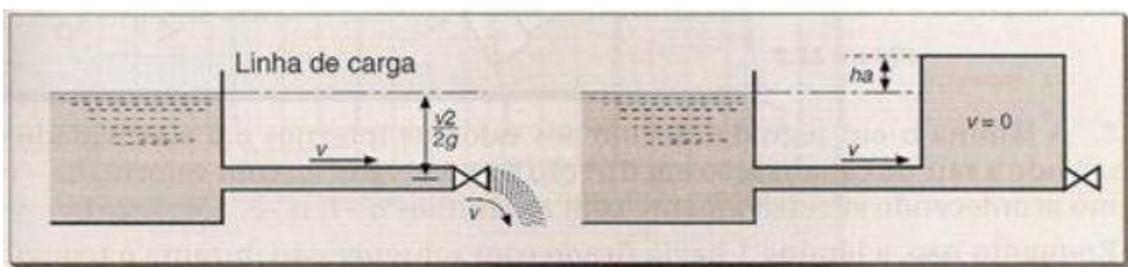


Figura 5. Representação Gráfica de Sobrepressão devido ao fechamento brusco a jusante (SOARES, 2012).

Importante ainda citar um caso bastante comum, que é quando a onda é gerada pelo fechamento brusco de uma válvula a jusante e, portanto, há inicialmente a geração de uma onda de sobrepressão, ao contrário da situação anterior, expressa pela Figura

3. No supracitado caso da barragem do Jati-CE, uma das possibilidades poderá ser justamente esta, de fechamento brusco gerando uma sobrepressão e o rompimento no ponto mais frágil, porém isto é mera ilação até o presente momento (novembro/2020), devendo ser aguardado o laudo pericial.

Ressalta-se mais uma vez que a velocidade da onda é de padrão sônico, ou seja, não se trata da velocidade do fluxo no regime permanente e, portanto, exige medidas especiais de proteção.

14.4 Entendendo as soluções

Ainda considerando a Figura 4, quando a sobrepressão é superior à classe de pressão da rede, ocorrerá a ruptura dos tubos, equipamentos e possível lançamento de dispositivos associados (ventosas, válvulas, barriletes), podendo resultando em danos financeiros e, o pior, danos físicos a transeuntes e operadores, inclusive com risco de vidas. Quando a onda de sub-pressão "corta" a linha do terreno, gerando valores negativos, na prática significa que há vácuo, que é o pior dos casos de resolução dos transientes, sendo este valor limitado a -10,33 mca ao nível do mar, mesmo que em softwares sejam dispostos valores ainda menores, o que é na prática uma impossibilidade, mas que, porém, indicam a magnitude do problema.

Há diversos tipos de proteção destinados aos transientes hidráulicos, as quais atuam na sobrepressão, sub-pressão ou em ambos os casos, sendo as principais: (i) chaminé de equilíbrio (*Stand pipe*); (ii) tanque de ação unidirecional (TAU) (*One Way Tank*); (iii) reservatório hidropneumático (RHO ou RHP); (iv) volante de inércia; (v) válvula antecipadora de ondas; e (vi) ventosas de duplo, tríplice efeito ou válvulas quebra vácuo.

Há casos nos quais as soluções podem ser isoladas, ou conjugadas, a depender das características das envoltórias.

As Figuras 6 a 17 ilustram a sua atuação e em todas elas há o comparativo dos efeitos transitórios com e sem os supracitados dispositivos.

14.4.1 Chaminé de equilíbrio (Stand Pipe)

Este dispositivo atua em ambos os sentidos (sobre e sub-pressões). Trata-se de uma chaminé, aberta em ambos os lados (em cima e em baixo), de modo que quando atua a sobrepressão, esta alivia para a atmosfera evitando o rompimento do tubo e, no caso contrário, injeta a água armazenada durante a operação e não permite o fenômeno do "descolamento de coluna", que leva ao colapso (achatamento) das tubulações. A tradução de sua denominação em inglês é literalmente "tubo em pé", definição bem simples.

Trata-se, de modo geral, da mais cara das soluções, pois exige obras civis de grande monta.

Observa-se na imagem que as envoltórias de máxima (vermelha) e de mínima (magenta) são transportadas para a chaminé, evitando tanto o rompimento quanto o colapso da rede.

A Tabela 2 demonstra as vantagens e desvantagens da chaminé de equilíbrio.

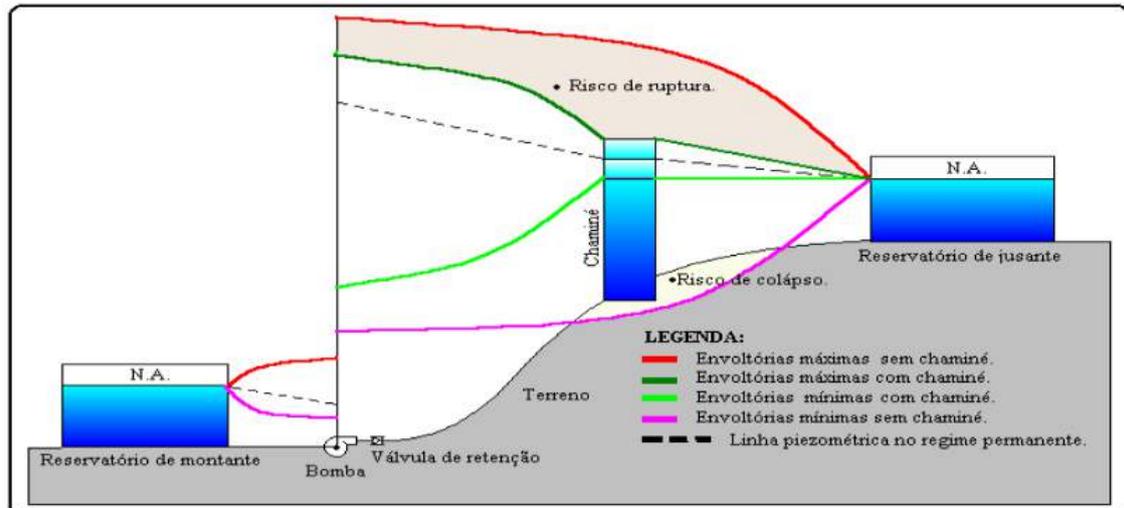


Figura 6. Representação Gráfica da Atuação da Chaminé de Equilíbrio (JUNIOR, 2018).

Tabela 2. Vantagens e Desvantagens - Chaminé de Equilíbrio (*Stand Pipe*).

Vantagens	Desvantagens
Atua nas envoltórias de máxima e mínima	Custo inicial elevado
Não há consumo de energia elétrica	
Baixo custo de manutenção	

14.4.2 Tanque de ação unidirecional (TAU) (*One Way Tank*)

Como o nome diz, este dispositivo atua apenas em um sentido, na sub-pressão, e se trata de um reservatório, aberto na parte superior, alimentado por uma tubulação e com saída na parte de baixo, na qual há uma válvula de retenção que não permite o seu transbordamento quando da operação da rede, mas que, porém, se abre quando há necessidade de injeção de água para evitar o seu colapso, após paralisação inadequada.

Trata-se de um dispositivo bastante seguro e largamente empregado, porém também a sua aplicação exige uma análise de custos. Segundo o Engenheiro Civil Marcelo Cardim, "caso o sistema necessite de mais de 03 TAUs, deve-se buscar outra solução mais barata".

No TAU, pode-se observar que a envoltória de mínima sem a proteção (magenta), de valor negativo (corta o terreno) é deslocada para um valor > 0 (zero), representado pela linha azul clara. No caso da ilustração, foi eliminado qualquer risco de colapso da rede.

A Tabela 3 demonstra as vantagens e desvantagens do TAU (*One Way Tank*).

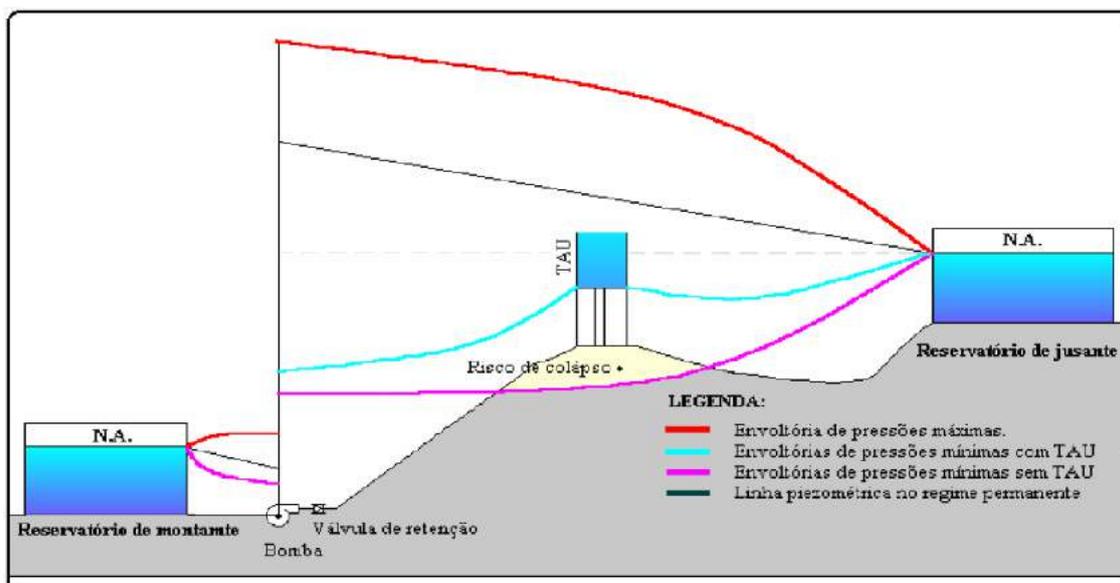


Figura 7. Representação gráfica da atuação do tanque de ação unidirecional (TAU) (JUNIOR, 2018).

Tabela 3. Vantagens e desvantagens do tanque de ação unidirecional (TAU) (*One Way Tank*).

Vantagens	Desvantagens
Anula as subpressões, evitando o colapso (achatamento) da rede	Alto custo de implantação
Não exige consumo de energia elétrica	Não protege contra sobrepressões
	Protege trechos específicos da rede
	Exige manutenção constante

14.4.3 Reservatório hidropneumático (RHO ou RHP)

Dentre as diversas alternativas para arrefecimento de efeitos transitórios, o RHO é uma excelente opção, não apenas pelo fato de atuar em ambas as envoltórias (mínima e máxima) como pela simplicidade de instalação, operação e manutenção.

O RHO é um tanque de aço ou concreto que possui água e ar comprimido, o qual pode ser através de bexiga de poliuretano (melhor opção) ou com a ajuda de compressor de ar, opção última que requer fonte de energia externa para a sua operação. Em qualquer um dos modelos, o ar mantém o seu interior com pressão igual à da rede hidráulica em regime permanente, fornecido pela elevatória quando esta estiver acionada.

Quando ocorre o transiente, o dispositivo transforma a sua velocidade de rápida para lenta, reduzindo os riscos de colapso e/ou rompimentos. Na verdade, o RHO absorve as ondas, e em seu interior que ocorre as variações em grande velocidade, transferindo para este os efeitos que incidiriam na rede e sobre seus acessórios. Devem ser instalados sempre a montante da válvula de retenção.

A Figura 8 explicita os componentes básicos do RHO, marca HYDRAMER.

1. Reservatório
2. Bexiga de poliuretano
3. Válvula de enchimento de ar
4. Manômetro
5. Indicador de nível
6. Purga de ar
7. Ligação com a rede
(fornecimento opcional)

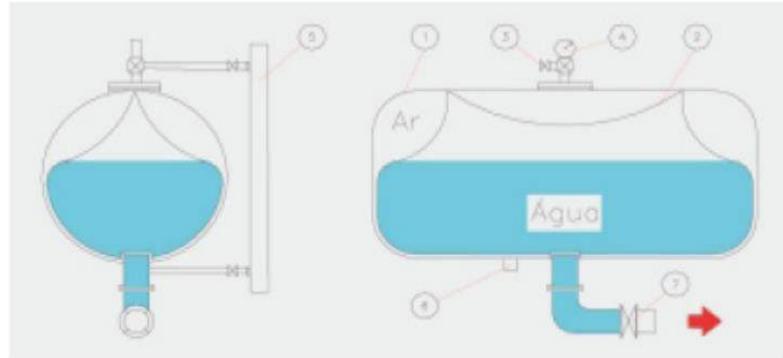
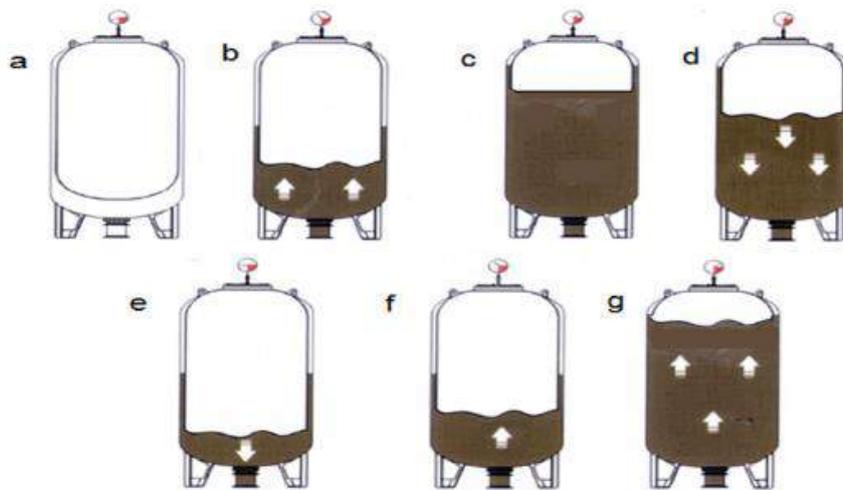


Figura 8. Componentes gerais do RHO (HIDROSTEC, s.d.).

A Figura 9 detalha a operação do RHO.



- a) Bexiga com a pré-carga de gás estabelecida em projeto. Sistema em repouso. Bexiga em repouso e RHO vazio;
- b) Estando a rede desligada, porém já preenchida com água (carga estática incidente), abre-se a válvula de isolamento e a água ocupa parcialmente o RHO, sendo a pressão estática sempre maior do que a pré-carregada com gás na bexiga;
- c) Uma vez ligada a bomba, a pressão da rede comprimirá a bexiga mais ainda, injetando mais água no RHO, até atingir o equilíbrio dinâmico pressão da rede *versus* compressão da bexiga;
- d) Após falta de energia na elevatória ou desligamento involuntário do sistema, a queda de pressão (sub-pressão) imediatamente leva à expansão do ar da bexiga, evitando a formação de vapor d'água;
- e) Atinge-se a maior expansão da bexiga;
- f) O retorno da onda de pressão (sobrepessão) desta feita leva ao enchimento do RHO, comprimindo novamente o ar da bexiga; e
- g) Compressão máxima da bexiga.

Figura 9. Detalhamento da atuação do RHO (SCHIMDT, 2016).

Após várias oscilações do gênero, atinge-se o estado de equilíbrio demonstrado em "d".

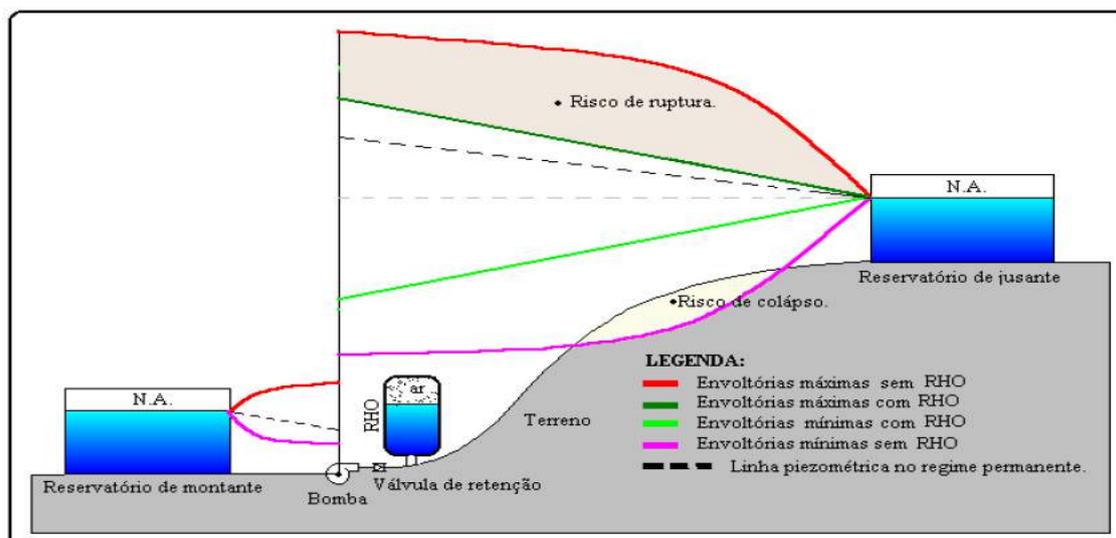


Figura 10. Representação Gráfica da Atuação do RHO (JUNIOR, 2018).

Tabela 4. Vantagens e desvantagens do reservatório hidropneumático (RHO).

Vantagens	Desvantagens
Controla as envoltórias de máxima e mínima	Custo relativamente elevado, a depender das dimensões
Não depende da topografia	Aqueles com compressor consomem energia
Os de bexiga de poliuretano não exigem compressores para a atuação	
Para de bexiga de poliuretano basta verificar o manômetro instalado para observar a necessidade de manutenção	Aqueles com compressor exigem manutenção do compressor e equipamentos elétricos
Os de bexiga de poliuretano não necessitam de energia para operação	

14.4.4 Volante de inércia

São dispositivos instalados entre as bombas com mancal e os motores, através de acoplamentos elásticos. São dimensionados para aumentar o momento de inércia (ou parada) do conjunto girante, reduzindo sobretudo a velocidade da onda de subpressão, quando da falta de energia ou desligamento acidental do sistema.

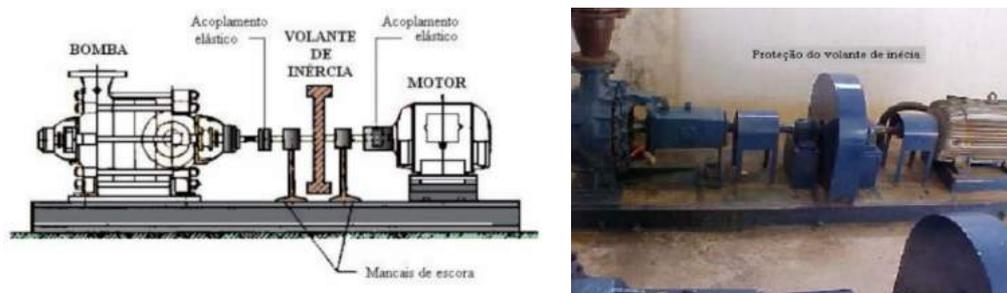


Figura 11. Volante de Inércia (GUAZZELLI, 2015).

De igual forma que retarda a parada (ou inércia) dos conjuntos, este dispositivo também retarda o seu acionamento até que se atinja a rotação devida. Muito adequado para limitar as sub-pressões nos pontos altos das adutoras, protegendo-as dos colapsos decorrentes do “descolamento de coluna”. Como o volante de inércia atua através de seu próprio peso, de modo que não atinja dimensões exageradas, deve-se analisar o tamanho máximo da elevatória para a sua aplicação.

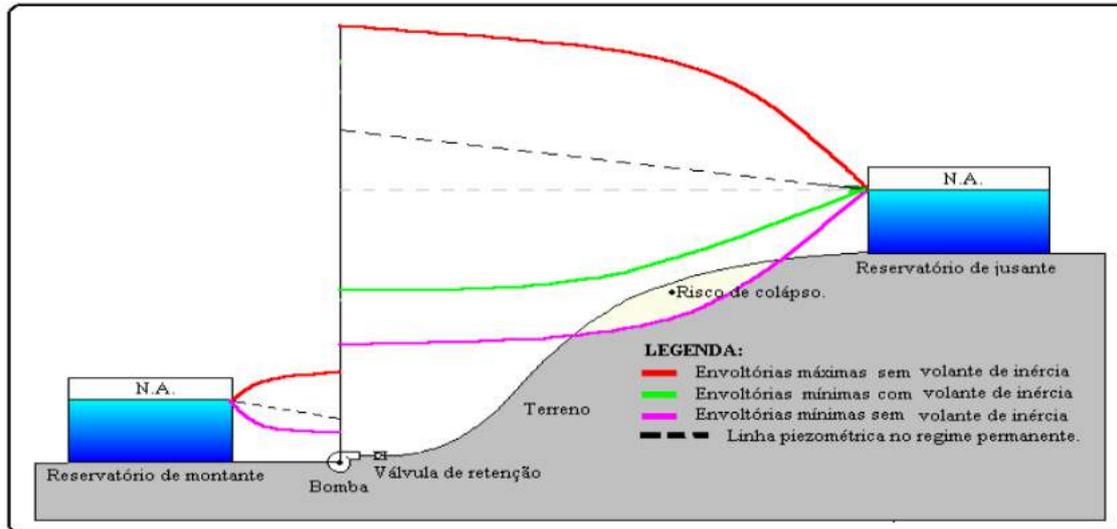


Figura 12. Representação gráfica da atuação do volante de inércia (JUNIOR, 2018).

Observa-se o pouco efeito do volante de inércia no que tange as sobre-pressões, tanto que sequer consta na Figura 12. Assim, caso estas ocorram em magnitude comprometedora, é o caso típico de associar outro dispositivo, como uma válvula antecipadora de ondas, por exemplo.

É de bom alvitre que o volante de inércia seja calculado e fornecido pelo fabricante.

Tabela 5. Vantagens e desvantagens do volante de inércia.

Vantagens	Desvantagens
Controle apropriado das sub-pressões	Não controla de modo suficiente as sobre-pressões
Baixo custo	Consome mais energia elétrica do que um conjunto sem volante

14.4.5 Válvula antecipadora de ondas

Trata-se de dispositivo de baixo custo e de fácil instalação, é largamente utilizado em todo o Planeta, garantindo a integridade das redes e, em alguns casos, das pessoas.

As válvulas hidráulicamente operadas são equipamentos muito utilizados nas redes em geral e aplicáveis a quase todos os fluidos. O funcionamento dessas válvulas, mais especificamente as funções de abertura e fechamento, se dá por meio do desequilíbrio das forças atuantes.

A função Antecipadora de Ondas (RE ou SA) é obtida através da colocação de elementos chamados de pilotos, os quais transformam as válvulas em “entes inteligentes”. Existem pilotos de 02 ou 03 vias, porém para funções de proteção e que exigem atuação rápida, com Alívio (PS/R), Alívio Rápido (QR) e antecipadoras de ondas,

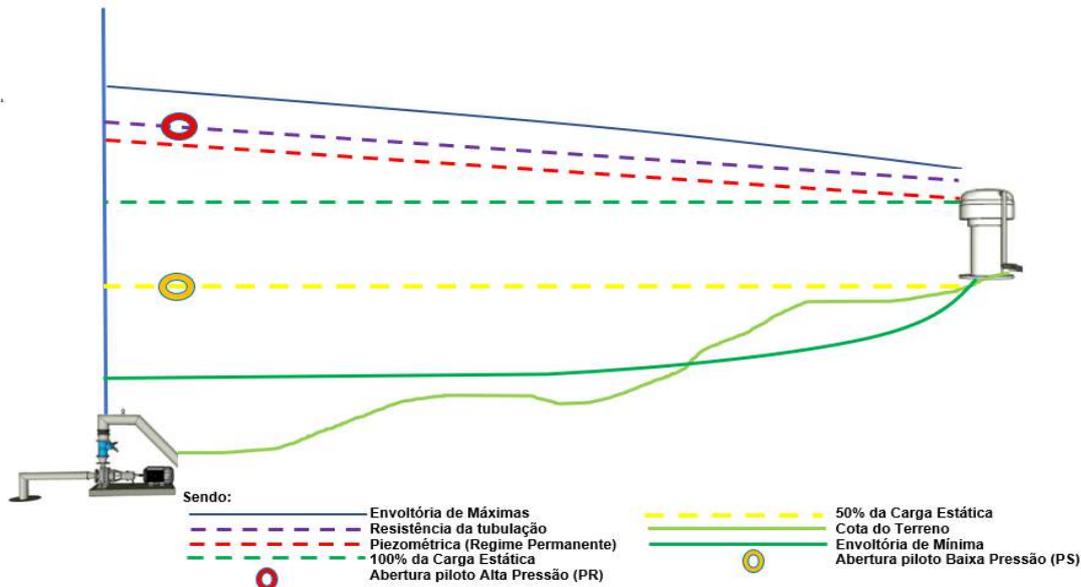


Figura 14. Atuação da Válvula Antecipadora de Ondas (VIEIRA, 2019).

Adotando-se as “Thumb Roles” (Engenheiro Mecânico Francisco Veiga - Informação pessoal) usualmente utilizadas, a válvula RE (ou SA) deve ser regulada para que o piloto de baixa pressão abra a válvula quando a pressão transitória atingir 50% da pressão estática, e o piloto de alta para atuar quando este valor for 10% acima da classe de pressão do tubo. Há ainda outra regra geral que é de se regular o piloto “de alta” (PS) 1 bar acima da AMT da bomba (Engenheiro Agrônomo Danilo Pinto – Informação pessoal, BERMAD).

Ressalta-se que a válvula deve ficar montada em “TÊ”, logo após a válvula de retenção. “Uma dica importante é que a tomada de pressão dos pilotos não seja feita no corpo da válvula, mas sim em colar de tomada em separado porque, uma vez aberta, os efeitos da onda e sua magnitude são “mascarados” pela descarga livre” (Técnico em Mecânica Robson Amorim – Informação pessoal). Na Figura 15, observam-se os pilotos de baixa e de alta, representados por “#2” e “#3”, respectivamente.

Como esta válvula atua somente para as sobre-pressões, os estudos de transientes podem apontar para soluções conjugadas, como ventosas, TAUS e até chaminés de equilíbrio.

A Figura 15 demonstra graficamente a representação gráfica dos pilotos da Válvula Antecipadora de Ondas, e a Figura 16 a da sua atuação propriamente dita.

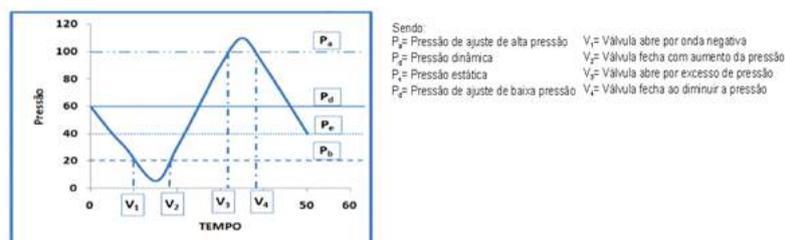


Figura 15. Representação gráfica dos pilotos da válvula antecipadora de ondas (VIEIRA, 2019).

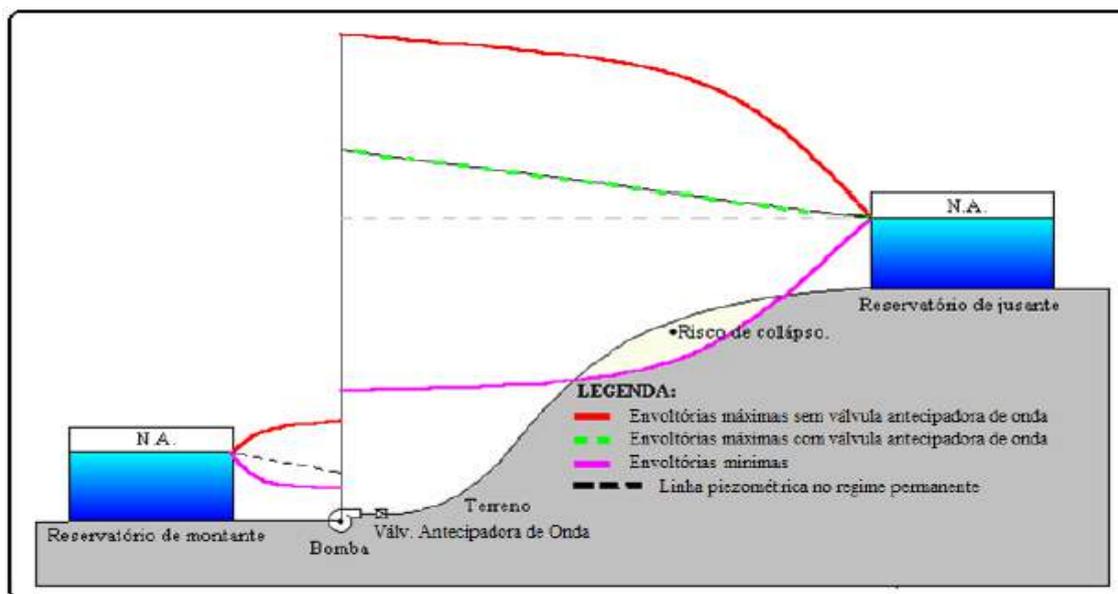


Figura 16. Representação gráfica da atuação da válvula antecipadora de ondas (RODRIGUES JUNIOR, 2018).

Tabela 6. Vantagens e desvantagens - válvula antecipadora de ondas.

Vantagens	Desvantagens
Controle das envoltórias de máxima.	Não controla sub-pressões.
Baixo custo de implantação e manutenção.	Pode ser necessário ser associada às ventosas.
Normalmente não utiliza energia extra (elétrica), apenas a do sistema.	Em alguns casos pode ser necessário associar a dispositivos para facilitar o fechamento após a sua atuação.

14.4.6 Ventosas de duplo e tríplice efeito e válvulas quebra vácuo

Dentre os fenômenos transitórios, aquele de mais perigoso e de difícil solução é justamente a sub-pressão, posto que, na pior das hipóteses, problemas de sobrepressão podem ser resolvidos apenas alterando-se a classe de pressão da rede.

Ventosas de duplo e tríplice efeito são dispositivos que expurgam e inserem o ar na tubulação quando do seu enchimento e esvaziamento, respectivamente. Já as denominadas de "quebra vácuo" apenas inserem enormes quantidades de ar quando do descolamento de coluna, e podem ser uma das alternativas.

As tubulações possuem uma resistência máxima á efeitos da sub-pressão, sendo considerados valores entre -1 e -2 mca para tubos plásticos, e de até -7 mca para ferro fundido, a depender do autor / profissional. Alguns deles, inclusive e visando a máxima segurança, não aceitam valores negativos, por menores que sejam. Há um equívoco comum, propagado no meio técnico na forma de "efeito manada", de que basta a colocação de ventosas para que sejam resolvidos todos os problemas das envoltórias de mínima. Este mito leva muitos profissionais à uma espécie de "Síndrome de Panúrgio", que pode resultar, a exemplo da lenda, em "afogamento" profissional e vários problemas desconfortáveis. Analogias e Mitologia à parte, as ventosas são itens que podem ou não resolver totalmente a questão, assim como também, em muitos casos, são itens complementares de outras soluções.

Quando da elaboração de simulação de transientes em softwares como o UFC, os efeitos transitórios são analisados apenas com aquelas ventosas localizadas para tal destinação, ressaltando-se que as demais, a serem colocadas nas redes nas situações clássicas, serão mantidas à parte da análise de transientes. Assim, no software constam apenas as ventosas para arrefecer a sub-pressão, porém as demais, destinadas ao regime permanente, são mantidas, mas não entram nos cálculos.

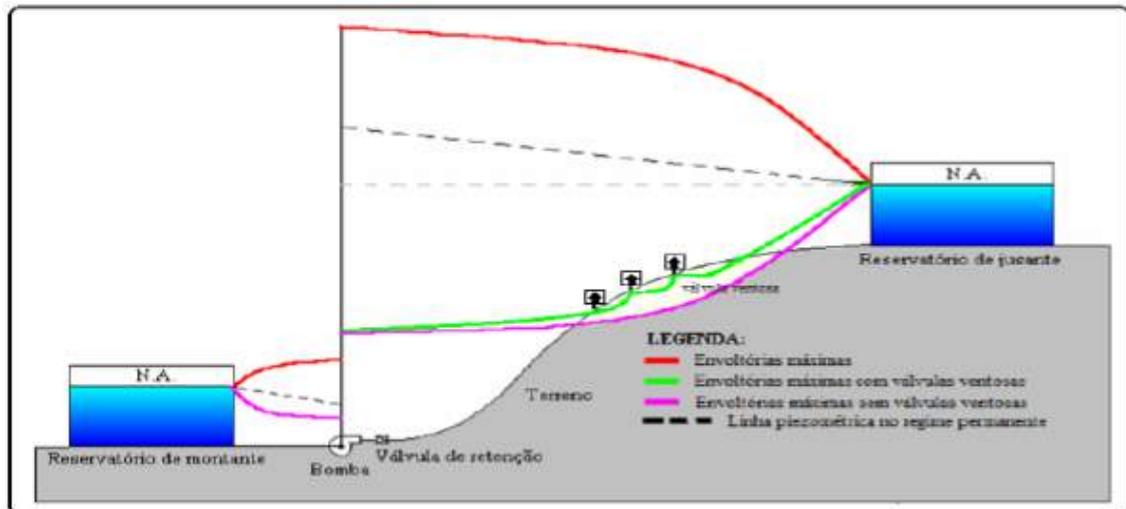


Figura 17. Representação gráfica da atuação das ventosas (JUNIOR, 2016).

Tabela 7. Vantagens e desvantagens das ventosas e quebra vácuo.

Vantagens	Desvantagens
Pode resolver problemas de sub-pressão	Não atua em sobre-pressões
Baixo custo de aquisição	Uma eventual falha pode afetar com gravidade o sistema
Baixo custo de operação e manutenção	
Fundamental para enchimento e esvaziamento de redes	Pode não ser solução única, mas associada a outras
Simplicidade de aplicação	

14.5 Estudos de casos - exemplos reais

Neste item serão apresentadas situações reais, nas quais, caso não fossem adotadas as soluções contra os transientes obtidas a através do software UFC, poderia haver graves consequências materiais e até físicas. Como o tema transientes hidráulicos ainda é praticamente desconhecido na área da Agricultura Irrigada, e não é comum e nem adotado em larga escala como deveria, de modo a respeitar e proteger os colegas projetistas alguns dos casos não serão identificados.

14.5.1 Exemplo 1 - Adutora Caiçaras - trecho Campos Novos - Olho D'água

Projeto: Codevasf - Rodrigo Franco Vieira;
 Material: FF nodular K7 -100mm;
 Distância: 6.800m;
 Desnível: 80m;
 Vazão: 19.20 m³ h⁻¹;
 AMT: 130 mca;

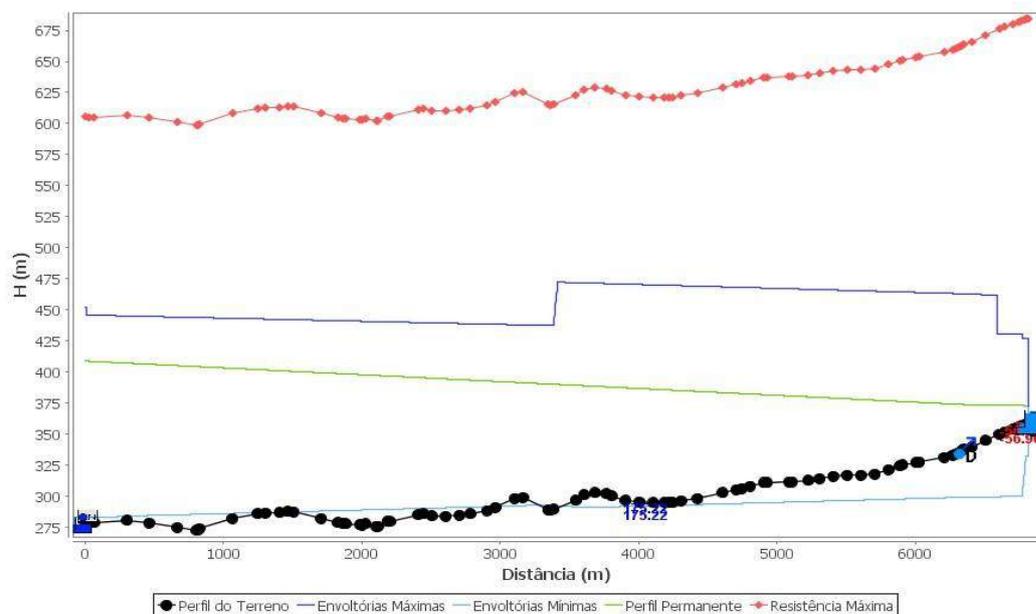


Figura 18. Análise inicial de transientes sem proteção (Exemplo 1).

Sobre-pressão máxima: 175.22 mca;
 Sub-pressão teórica: -56.90 mca; -10.33 mca na prática;
 Diagnóstico: risco de colapso pela sub-pressão;

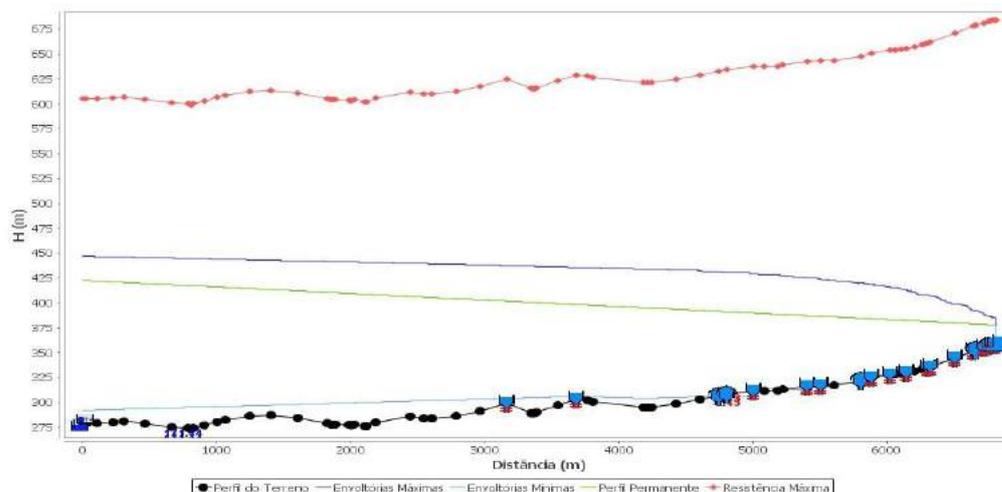


Figura 19. Solução 1 - 8 TAUs + 8 Ventosas.

Resultados 1:

Sobre-pressão máxima: 171.44 mca;
 Sub-pressão teórica: -2.43 mca;
 Diagnóstico: problema resolvido.

Contudo, Cada TAU foi orçado à época (agosto/2020) em R\$ 90.000,00, perfazendo um valor exorbitante (R\$ 720.000,00), buscando-se outra solução.

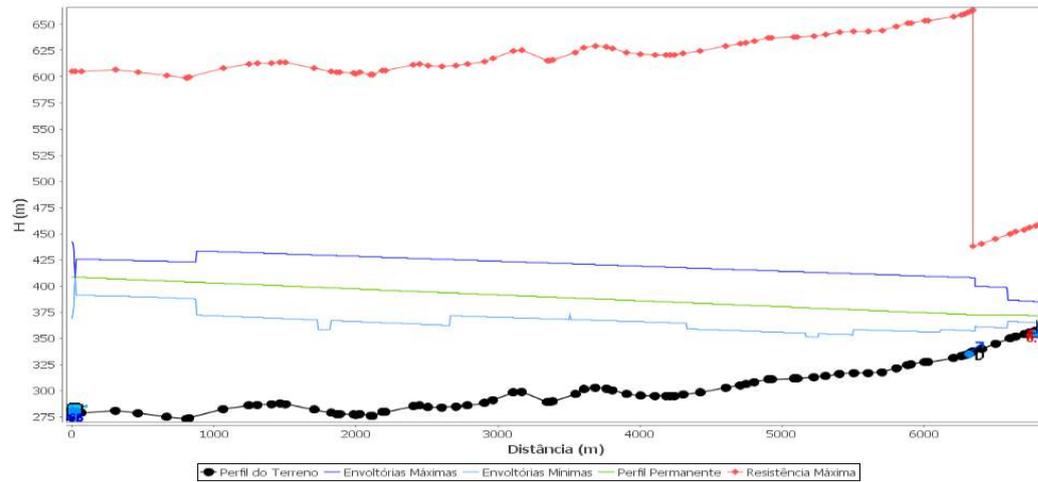


Figura 20. Solução 2 - 01 RHO.

Resultados 2:

Sobre-pressão Máxima: 150.00mca;
 Pressão mínima: 6.80mca;
 Diagnóstico: problema resolvido;
 Custo do RHO: R\$ 90.000,00.

Neste 1º exemplo ficou evidenciado como a correta análise dos transitórios evitou acidentes e prejuízos financeiros.

14.5.2 Exemplo 2 – Adutora principal Projeto Gavião - São José da Tapera – Alagoas

Projeto: Rodrigo Franco Vieira / Metal Engº;
 Material: PVC DEFOFO IRRIGA LF 500mm a 100mm / PN 60 a PN 125;
 Distância: 3.500m;
 Desnível Total: 80m;
 Vazão: 675 m³ h⁻¹;
 AMT: 20 mca;

Aplicando-se apenas a teoria de Allievi quando da elaboração dos cálculos, a qual é inadequada para a determinação de efeitos transitórios, porém com a devida preocupação com o Regime Permanente, obteve-se os efeitos transitórios expressos na Figura 20, sendo os seus resultados numéricos.

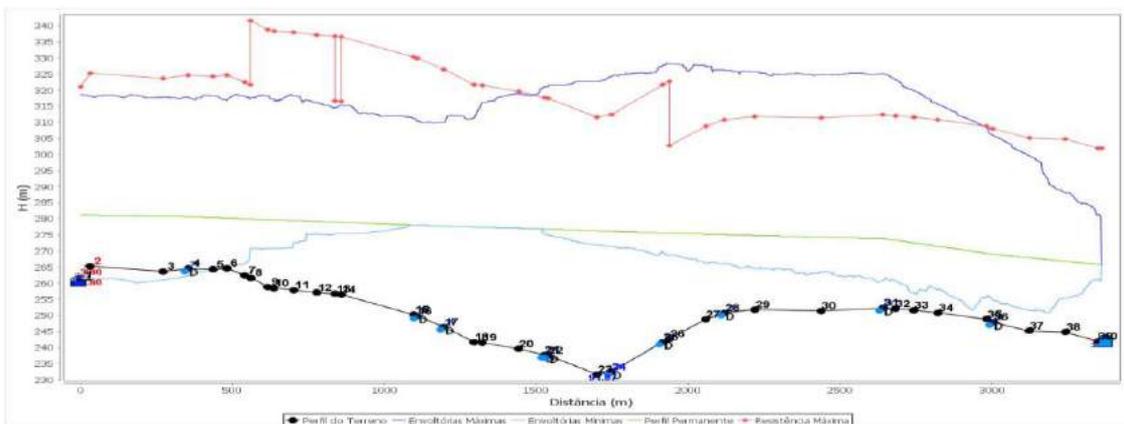


Figura 21. Análise inicial de transientes sem proteção (Exemplo 2).

Sobre-pressão Máxima: 98.00mca;
 Sub-pressão teórica: -3,8mca, inadequada para PVC;
 Diagnóstico: risco de colapso por sobre e sub-pressões;
 Risco grave de rompimento (Sobre-pressão) até os 1.500 m de rede e após os 3.000 m;
 Risco de colapso (Sub-pressão) até os 400 m de rede.

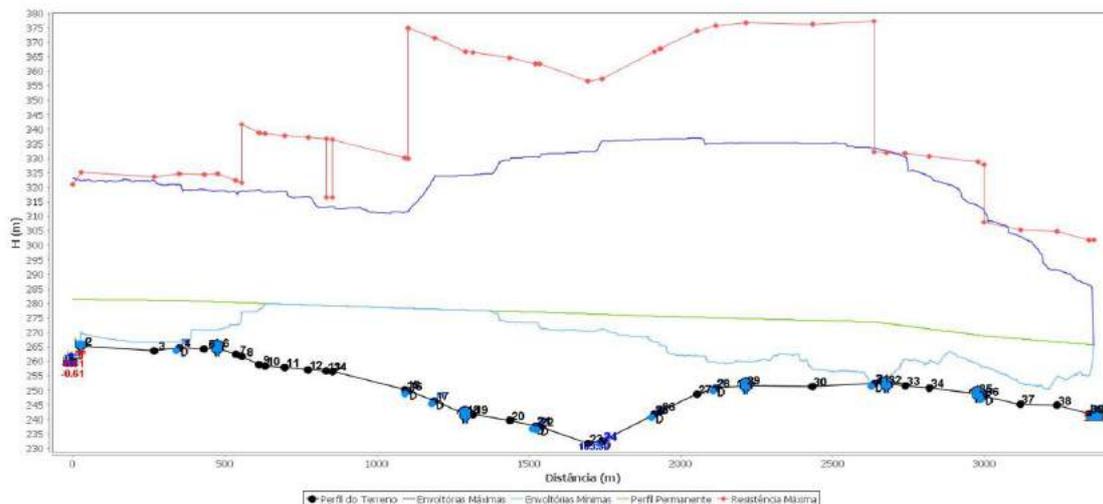


Figura 22. Solução única. Troca de tubos (Classes de Pressão) + 1 TAU + 5 Ventosas.

Resultados (Exemplo 2):

Sobre-pressão Máxima: 97.00mca;
 Sub-pressão: -0.61mca;
 Diagnóstico: problema resolvido.

14.5.3 Exemplo 3 - Projeto de adutora para área irrigada - SP

Projeto: Não Identificado;
 Material: PVC IRRIGA LF PBS / PN 60 a PN 125;
 Distância: 1.150m;
 Desnível: 85m;
 Vazão: $13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
 AMT: 133.75mca;

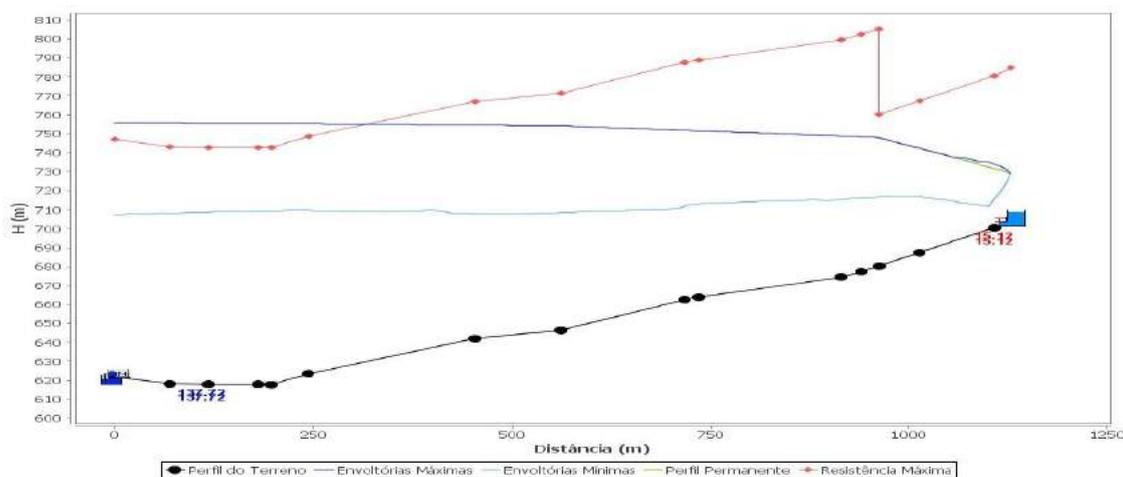


Figura 23. Análise Inicial de Transientes sem Proteção - Exemplo 3.

Sobre-pressão máxima: 137.72mca;
 Pressão mínima: 15.12mca;
 Diagnóstico: risco de ruptura pela sobre-pressão até os 350m;

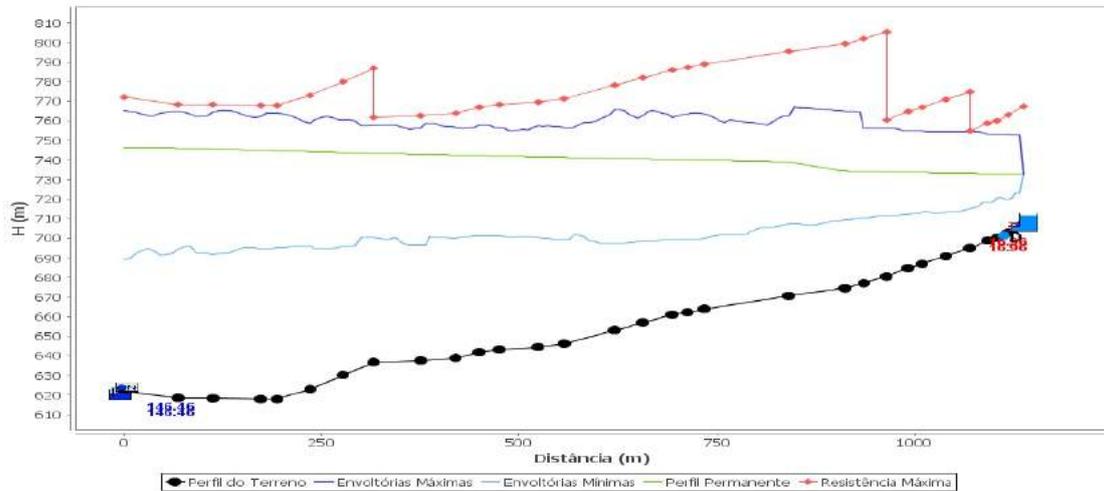


Figura 24. Solução Única - Troca de Tubos (Classes de Pressão PN 150).

Resultados Exemplo 3:

Sobre-pressão máxima: 146.00mca;
 Pressão mínima: 17 mca;
 Diagnóstico: problema resolvido, em fase de projeto.

14.5.4 Exemplo 4 - Projeto de adutora para área irrigada - MG

Projeto: Não Identificado, mas já implantado, com rompimentos diários;
 Material: PVC DEFOFO IRRIGA LF / PN 60 e PN 80;
 Distância: 567m;
 Desnível: 35m
 Vazão: 90 m³ h⁻¹;
 AMT: 72mca;

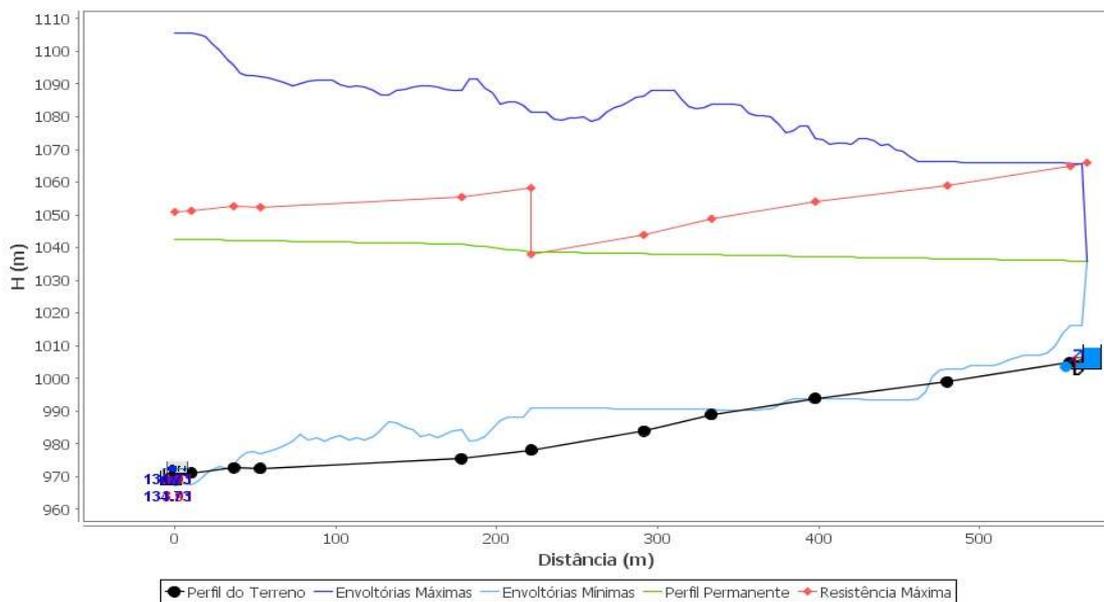


Figura 25. Análise dos Transientes - Situação Atual - Exemplo 4.

Resultados Exemplo 4:

Sobre-pressão máxima: 134.00mca, sendo o tubo PN 80;
Sub-pressão: -3.91 mca;
Diagnóstico: Rompimentos serão cada vez mais constantes.

No Exemplo 1, o fato da rede ser de ferro fundido - sobre o qual há um jargão na engenharia hidráulica de que este "aguenta desaforo" -, pode dar para muitos a impressão de ser incólume, o que não é verdade. Além disso, a avaliação econômica também deve ser observada pois, segundo Dr. Marco Aurélio de Castro, "mais cara é uma avaria e suas consequências" (informação pessoal²) No caso específico, a rede já estava implantada e a paralisação da obra por anos permitiu a correção adequada.

No Exemplo 2, observando-se a Figura 20, o método inadequado indicou que a rede suportaria as pressões do regime permanente (linha vermelha *versus* linha verde), porém a aplicação do software UFC demonstrou que a rede iria entrar em colapso no início devido a sub-pressão, bem como se romper devido a sobre-pressão entre 1.500 e 3.000 m da rede. A análise adequada apontou para uma solução conjugada (TAU + ventosas + troca de tubos). Por sorte, o problema foi corrigido ainda na fase de projeto.

Ao nos remetermos ao Exemplo 3, o diagnóstico e a análise dos efeitos transitórios vieram a calhar, posto que a rede ainda não tinha sido implantada e, portanto, a troca dos tubos PN 125 por PN 150 salvou o projeto de todo e qualquer rompimento, além de que não se verifica sub-pressão e, portanto, não haverá colapsos também. Por coincidência, no dia 12 de novembro de 2020, fomos notificados que testes de desligamento brusco realizados na adutora confirmaram que a solução analisada através do UFC foi adequada e correta.

Na Figura 25, ou Exemplo 4, trata-se de um projeto antigo e que, após 12 anos de operação, passou a ser necessário o reparo da rede quase todos os dias, com luvas de FF, de alto custo. Este caso corrobora com a assertiva de que grandes projetistas da área de irrigação não são preocupados e/ou não têm acesso aos métodos de análise de transientes, o que em algum momento poderá se revelar da pior forma (rompimentos).

Ao observarmos as linhas vermelha (resistência máxima da rede) e verde (perfil permanente ou linha piezométrica), nota-se que os projetistas foram precisos e cirúrgicos, e ninguém provavelmente faria melhor, considerando as condições existentes. No entanto, a linha azul (envoltória de máxima ou sobre-pressão), advinda da aplicação do software UFC, demonstra que TODA a rede está sujeita a rompimentos, além de que em seu trecho inicial a sub-pressão (-391mca) é mais intensa do que o recomendado para tubos de PVC.

Como a troca de toda a rede é bastante onerosa, mesmo em se tratando de projeto de cafés especiais, e só deverá ser feita paulatinamente em função da vida útil da rede, a solução imediata proposta (e paliativa) foi a da colocação de válvula antecipadora de ondas, regulada para abrir em $(35 \text{ m} \div 2 =) 17 \text{ mca}$ (piloto de baixa) e em 80 mca (piloto de alta).

Ressalta-se, ainda para o Exemplo 4, que a recomendação inicial foi o aproveitamento de uma válvula metálica existente (50 mm) na fazenda, de diâmetro adequado, o que exigiria apenas a colocação de mais 1 piloto e o ajuste no circuito. No entanto, o proprietário preferiu adquirir uma nova válvula de diâmetro superior (75 mm), também metálica, e procedeu com a sua instalação. De igual modo que no

² Informação recebida por Dr. Marco Aurélio de Castro durante curso ministrado sobre o programa UFC – Juazeiro, Bahia, 2020.

exemplo anterior, já há a informação também de que os rompimentos acabaram, pois a válvula atua a cada desligamento, protegendo a rede (solução paliativa recomendada).

Como as válvulas plásticas resistem mais à cavitação do que as metálicas, e como a antecipadora está regulada para a pressão máxima da rede (80 mca), foi adquirido o dispositivo mais caro, sem que houvesse necessidade, pois, ao abrir na pressão citada, esta cairá imediatamente e nunca será danosa à válvula plástica, que resiste a até 100 mca de pressão.

Não foi adotada a *Thumb Rule* dos 10% acima da classe de pressão da rede posto que esta já se encontra bastante fatigada e fragilizada.

14.6 Considerações finais

Além do fundamento teórico, apresentado de modo superficial neste capítulo - porém necessário para a compreensão de tema tão complexo - da apresentação de diversas formas de arrefecimento dos efeitos transitórios, é também importante se observar os exemplos dispostos, os quais bem ilustram a pouca afeição e preocupação de grande parte dos profissionais de ciências agrárias, por vários motivos, inclusive por não terem acesso às ferramentas adequadas para o entendimento do fenômeno e aplicação das soluções.

“A Agricultura Irrigada é bem mais do que a aplicação de água com mentalidade de sequeiro” (informação pessoal³), segundo o Prof. Dr. Fernando Bráz Tangerino, e com igual espírito, entende-se que a preocupação e busca pela compreensão e soluções contra os transientes hidráulicos deverá ser cada vez mais popularizada, elevando a qualidade da Agricultura Irrigada e do Agronegócio, eterna “tábua de salvação” do país, em todos os momentos.

Referências

BERMAD VALVES, **Catálogo BERMAD IRRIGATION IOM IR-735-M**. 2021.

CORDEIRO, M.; ALMEIDA, V. **2 mil pessoas são retiradas de casa no entorno da barragem de Jati, no Ceará, após rompimento de tubulação**. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2020/08/22/duas-mil-pessoas-sao-evacuadas-do-entorno-da-barragem-de-jati-no-ceara-apos-rompimento-de-tubulacao.ghtml>. Acesso em: 9 abr. 2021.

COSTA, R.N.T. **Golpe de aríete - transiente hidráulico** - Hidráulica Aplicada - AD 0195-UFC. Disponível em: <http://www.gpeas.ufc.br/disc/hidr/aula05.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2021.

Detalhes do rompimento da adutora da hidroelétrica da Barragem do Jati, Ceará, Projeto de Integração do Rio São Francisco. Disponível em: https://www.google.com/search?q=IMAGENS+JATI&tbm=isch&ved=2ahUKEwiziqOi85TwAhVXBLkGHR-VCB0Q2-cCegQIABAA&oq=IMAGENS+JATI&gs_lcp=CgNpbWcQAZIGCAAQCBAeMgYIABAIEB4yBggAEAgQHjIGCAAQCBAeOgYIABAHEB46CAgAEAgQBxAeUO6fA1iLsANg2LEDaABWAHgAgAGNAYgBwgeSAQMwLjiYAQCgAQGqAQtnD3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&scient=img&ei=FAWDYLowMdeI5OUPn6qi6AE&bih=722&biw=1536&hl=pt-pt

GUZZELLI, M. **Reunião Técnica para Análises de Adutoras de Irrigação e Fertirrigação**. Itumbiara - GO. 2015. Acesso em: <http://www.gifc.com.br/wp-content/uploads/2017/02/Hidroambiental-GIFC.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2021.

³ (Informação recebida por Dr. Fernando Bráz Tangerino durante palestra no XXVII CONIRD / V INOVAGRI MEETING, FORTALEZA, CEARÁ, 2019).

HIDRO-AMBIENTAL. **Sistemas de proteção e controle hidráulico**, s.d. Disponível em http://www.hidroambiental.com.br/downloads/institucional/hidro_catalogo_protecao.pdf. Acesso em: 9 abr. 2021.

HYDROSTEC. **Catálogo circuitos pressurizados**, s.d. Disponível em: https://www.hydrostec.com.br/?page_id=15. Acesso em: 9 abr. 2021.

RODRIGUES JUNIOR, A. Golpe de Aríete e Controle Hidráulico em Adutoras de Irrigação e Fertirrigação, Palestra para Eventostab, Ribeirão Preto, 2018.

LEGNER, C. **A Importância de cálculos de transiente hidráulico em tubulações**. 36. ed., ANO 6. 2017. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/4/a-importancia-de-calculos-de-transiente-hidraulico-em-tubulacoes#:~:text=Para%20o%20projeto%20de%20sistemas,de%20opera%C3%A7%C3%A3o%20dos%20equipamentos%20>. Acesso em: 9 abr. 2021.

NEIVA, R.M.; CASTRO, M.A.H. Modelagem Computacional de Transientes Hidráulicos em Sistemas de Recalque. In: SEMINÁRIO PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: o estado da arte e questões avançadas. **Anais do Semiárido**. João Pessoa-PB, 2002. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/trabalhos/A19_33.pdf. Acesso em: 9 abr. 2021.

RODRIGUES JUNIOR, A. **Golpe de Aríete e Controle Hidráulico em Adutoras de Irrigação e Fertirrigação**. Hidroambiental, Ribeirão Preto, 2018. Disponível em: http://www.stab.org.br/palestras_irrigacao_2018/aranisio_hidro-ambiental.pdf. Acesso em: 9 abr. 2021.

SANTOS; CASTRO. **Modelagem computacional de transientes hidráulicos em sistemas de recalque**, 2002.

SCHIMIDT, M.J.A. **Simulação de transiente hidráulico e combinação econômica da adutora para abastecimento público do município de Torrinha - SP**, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/140131>. Acesso em: 9 abr. 2021.

SOARES, H. **Hidráulica Geral**. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, ESA Prof. Homero Soares, 2012.

VIEIRA, R.R.F. Codevasf. **Manual de válvulas hidráulicas**, 2019.

CAPÍTULO 15

15 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

José Antônio Frizzone e Verônica Gaspar Martins Leite de Melo

Resumo

A formulação de muitas das críticas populares à irrigação é simplista e enganosa. Distinguir entre usos consuntivos e não consuntivos, consumo benéfico e não benéfico e identificar até que ponto a água que não é consumida pode ser recuperada para uso produtivo em outro lugar é fundamental para uma análise racional do desempenho dos sistemas de irrigação e a oportunidade para melhorias. Compreender as opções para lidar com a escassez de água é um assunto complexo. Em relação à disposição física da água, a terminologia e as análises para a concepção de projetos individuais de manejo da água nas fazendas, geralmente não fornecem informações adequadas quando há competição por água em escalas maiores e sem considerar que "perdas" de um local são "fontes" para outro. Em particular, os termos de "eficiência" carregados de valor podem enganar o leitor desinformado. As questões relacionadas à gestão da água e às intervenções para sua melhoria perpassa vários setores. Diferentes usuários e beneficiários da água têm interesses legítimos em como a água é alocada e usada em seus próprios setores, bem como em setores concorrentes. A linguagem e a terminologia do debate são importantes para o valor que a análise pode agregar ao conhecimento. Mesmo as discussões de especialistas podem ser confundidas por terminologias ambíguas, enquanto os setores dependentes de água não têm uma terminologia consistente para distinguir entre usos consuntivos e não consuntivos, ou fluxos de retorno recuperáveis e não recuperáveis. Este capítulo fornece uma visão geral dos conceitos de produtividade da água na agricultura irrigada e seus predecessores, como eficiência da irrigação e eficiência de uso de água, com foco na produtividade física da água, para um melhor planejamento da irrigação e uso eficiente da água no setor agrícola.

15.1 Introdução

Globalmente, a água doce é o recurso mais precioso; no entanto, as ameaças à segurança hídrica continuam afetando a saúde dos recursos hídricos. O ciclo global da água está sendo significativamente alterado pelo desenvolvimento humano e pelos efeitos resultantes dos processos de desmatamento, evapotranspiração e recarga de águas subterrâneas. Nas áreas urbanas e outras áreas em desenvolvimento, o crescimento da população reduz a disponibilidade de água doce, e a urbanização diminui a recarga das águas subterrâneas e aumenta o escoamento das águas pluviais. A urbanização também afeta a qualidade da água, pois o alto volume de escoamento de águas pluviais transporta contaminantes das áreas urbanas para as águas subterrâneas e para os corpos d'água da superfície.

A conversão da vegetação natural em terra agrícola resulta na extração excessiva de água para dar suporte à produção agrícola (SIEBERT; DÖLL, 2010), diminuindo a disponibilidade de água doce. Além disso, os agroquímicos, incluindo fertilizantes e pesticidas, têm sido utilizados indiscriminadamente para promover incrementos na produção de alimentos, resultando em violações dos padrões de qualidade da água. As mudanças climáticas também ameaçam a segurança hídrica global. Alterações na

frequência, padrão e volume dos eventos de precipitação afetam a qualidade e a disponibilidade da água, bem como a capacidade da infraestrutura atual de responder aos riscos climáticos extremos (MCNEILL *et al.*, 2017). O aumento da temperatura ameaça a disponibilidade e a qualidade dos recursos de água doce. Enfrentar com êxito o desafio da segurança hídrica exigirá uma abordagem holística e interdisciplinar que incorpore todos os fatores que influenciam a disponibilidade, acessibilidade e sustentabilidade dos recursos hídricos.

O suprimento suficiente de água é vital para garantir o crescimento e produção das culturas e a sobrevivência dos animais. A agricultura irrigada é a atividade que mais demanda recursos hídricos, representando aproximadamente 70% de toda extração de água doce dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (DEHGHANIPOU *et al.*, 2020). Práticas inadequadas de gestão da água na agricultura podem promover escoamento superficial excessivo, percolação profunda, contaminação da fonte hídrica por excesso de nutrientes ou de outros produtos químicos e baixa produtividade da água. Como consequência, nenhuma segurança alimentar ou hídrica pode ser alcançada em escala global, se consideradas independentemente (MCNEILL *et al.*, 2017). Portanto, é importante considerar as seguranças hídrica e alimentar por uma perspectiva interdisciplinar na busca da segurança global.

A grande demanda de água na agricultura compete com outras demandas, em particular as necessidades de fluxo ambiental para sustentar os ecossistemas naturais (JÄGERMEYR *et al.*, 2017; MALANO; DAVIDSON, 2009; PANG *et al.*, 2014; XUE *et al.*, 2017). A necessidade de fluxo ambiental é definida como o fluxo do rio necessário para manter de maneira sustentável a saúde ecológica dos ecossistemas naturais, como áreas úmidas e lagos (ARTHINGTON *et al.*, 2018; SMAKHTIN *et al.*, 2006; YASI; ASHORI, 2017). Em muitas partes do mundo, o aumento do consumo de água para irrigação levou à crescente pressão sobre os recursos hídricos disponíveis para atender aos requisitos de fluxo ambiental e resultou crescentes conflitos entre a demanda de água na agricultura e ambiental (DUNN *et al.*, 2003; XUE *et al.*, 2017). Esses conflitos são exacerbados pelas mudanças climáticas, secas e má gestão da água, especialmente em regiões áridas e semiáridas (MANCOSU *et al.*, 2015; VALIPOUR *et al.*, 2015). Efeitos adversos da redução do fluxo de água ambiental levaram à degradação de corpos aquáticos naturais, como lagos, zonas húmidas e oásis (SISTO, 2009).

Aumentar a eficiência do uso da água na agricultura requer decisões sábias sobre o sistema de irrigação, a estratégia e o método para programar a irrigação, entre outros fatores relacionados à gestão da água. Desde o início do ano 2000, a abordagem da produtividade da água tem sido amplamente sugerida para resolver esses problemas. Essa abordagem fornece indicadores úteis para o manejo e o desempenho econômico da irrigação. A análise da literatura, entretanto, mostra confusão no uso dos termos e falta de acordo nas equações (HEYDARI, 2004). Este texto é focado no uso racional da abordagem da produtividade para o irrigante melhorar a produtividade física e econômica da água de irrigação na escala de campo.

15.2 Eficiência da irrigação

O termo eficiência de irrigação (EI) é utilizado para se referir a indicadores que, através de uma razão entre quantidades de água envolvidas no processo de irrigação, expressam um balanço entre os seguintes volumes de água, em relação ao volume aplicado: (i) derivado da fonte de suprimento; (ii) aplicado à parcela; (iii) armazenado no solo à profundidade efetiva das raízes para contribuir com o objetivo desejado, (iv) evaporado e derivado pelo vento, (v) percolado e escoado superficialmente para fora

dos limites da área cultivada, e (vi) benéficamente ou razoavelmente usado na área cultivada.

Jensen (2007) destaca que o tradicional termo eficiência da irrigação (razão entre água consumida pelo processo de evapotranspiração da cultura e água derivada de um rio ou de outra fonte natural), conforme definido por Israelsen (1950), é parcialmente aplicável ao considerar a água consumida (evapotranspiração - ET) na produção do efeito desejado (produção da cultura). É um termo inapropriado ao considerar como desperdício a água que não foi consumida pelo processo de ET. Conforme salienta Perry *et al.* (2009) "perdas" na escala de campo ou de projeto de irrigação não são necessariamente "perdas" no sentido hidrológico, porque, de acordo com a lei da conservação das massas, a água "perdida" pode estar disponível para uso em algum outro ponto da bacia, ou em um aquífero.

Na escala de campo, ou de fazenda, a EI é a razão entre o volume de água de irrigação usada de forma benéfica (predominantemente, para ET das culturas e para remoção de sais para manter a produtividade do solo) e o volume total de água de irrigação aplicada (ajustada para as variações no armazenado de água de irrigação no solo) (BURT *et al.*, 1997). Anualmente, os governos gastam bilhões de dólares subsidiando tecnologias avançadas de irrigação, como sistemas de aspersão ou de gotejamento com o objetivo de aumentar a EI, entendendo que isso permitirá que a água seja realocada da irrigação para as cidades, indústrias ou ambiente, mantendo ou mesmo aumentando a produção agrícola. Entretanto, Grafton *et al.* (2018) apontam que aumentos na EI para campos cultivados raramente estão associados a aumentos da disponibilidade de água em maior escala, e que apenas um aumento na EI que reduz extrações de água pode ter um efeito insignificativo no consumo de água. Esse paradoxo, de que um aumento na IE em escala de campo não aumenta a disponibilidade de água em escala de bacia, é explicado pelo fato de que "perdas" de água não consumida em escala agrícola (por exemplo, escoamento superficial) são frequentemente recuperadas e reutilizados em escala de bacia hidrográfica.

15.3 Produtividade da água na agricultura

O termo produtividade refere-se à razão entre o produto obtido e o insumo utilizado (HEYDARI, 2014) e, ao contrário da eficiência, as unidades do numerador são diferentes das do denominador. Isso está de acordo com o conceito de produtividade física da água do cultivo (WFP) introduzido por Molden (1997), que ganhou ampla aceitação (KIJNE *et al.*, 2003). Há consenso sobre o numerador de WFP ser o rendimento comercial, mas a definição e os componentes do denominador diferem entre os autores. Alguns consideram apenas a água transpirada pela cultura (BOUMAN, 2007), mas a maioria dos autores inclui tanto a água evaporada do solo quanto a transpirada pela cultura, ou seja, a evapotranspiração (ET) (KIJNE *et al.*, 2003; SINCİK *et al.*, 2008; BLATCHFORD *et al.*, 2018). Pereira *et al.* (2012) sugerem o uso da água total envolvida na produção em vez de ET no denominador.

A produtividade física da água da cultura (WFP), é definida com a quantidade de produto no numerador. Mas, normalmente, os agricultores são motivados pelo aumento da lucratividade da agricultura e das receitas agrícolas pela gestão dos insumos. Portanto, o conceito de produtividade da água pode também se referir ao valor econômico da produção, conforme descrito por Rodrigues e Pereira (2009). Um termo adequado para o último é produtividade econômica da água (WEP), que se refere à razão entre produtos e insumos em termos monetários.

A escassez de recursos hídricos e a crescente competição por água, em muitos setores reduzem sua disponibilidade para irrigação. O manejo racional da água para a produção agrícola em condições de água escassa requer abordagens eficientes. Aumentar a WFP na lavoura e a tolerância à seca por meio do melhoramento genético das plantas e da regulação fisiológica podem ser os meios para alcançar o uso eficiente da água. Mas apenas altos valores de WFP possuem pouco ou nenhum interesse se não estiverem associados a rendimentos altos ou aceitáveis (GRAFTON *et al.*, 2018). A associação de valores altos (ou moderados) de produtividade da água com rendimentos altos (ou moderados) tem implicações importantes no uso efetivo da água.

Neste texto, são discutidos os fatores que afetam a produtividade da água e as possíveis técnicas para sua melhoria. Uma única abordagem não seria capaz de enfrentar o desafio de produzir mais alimentos e fibras com água disponível limitada. Combinando medidas biológicas de economia de água com soluções de engenharia (método de irrigação para economia de água, irrigação com *deficit*, sequenciamento adequado de deficits, modernização do sistema de irrigação, etc.), práticas agrônômicas e de manejo do solo (preparação das sementes, manipulação da idade das mudas, semeadura direta, adequada seleção de culturas, integração da agricultura e da aquicultura, aumento da fertilidade do solo, adição de matéria orgânica, preparo do solo e cobertura do solo, etc.) podem resolver o problema até certo ponto. Novas informações científicas são necessárias para melhorar os ganhos econômicos da produtividade da água, porque as futuras melhorias neste indicador parecem ser limitadas por fatores econômicos, mais que por falta de meios tecnológicos (GRAFTON *et al.*, 2018).

15.4 Eficiência da irrigação

15.4.1 Economia de água

Avaliar a economia de água na agricultura requer a análise do destino da água aplicada à colheita. Perry (2011) descreveram diferentes frações de água a serem consideradas. Parte da água aplicada é consumida no processo de evapotranspiração (ET), enquanto o restante, a fração não consumida, principalmente escoamento e drenagem, é devolvida com sua qualidade preservada ou degradada. Parte da fração consumida é benéfica (água consumida para atingir a meta de produção) e parte não benéfica (água consumida com impacto irrelevante na meta de produção). Dentro da fração não consumida, a quantidade de água desviada para as águas superficiais e subterrâneas com qualidade aceitável são reutilizáveis. É o caso da fração de lixiviação quando sua qualidade, apesar de ser degradada, é aceitável para reutilização. Neste caso, temos um uso benéfico de água (a remoção do excesso de sal do solo) e possivelmente um resíduo não benéfico (o excesso da fração de lixiviação), mas a água ainda é disponível para reutilização.

A economia de água é relativamente fácil de avaliar quando a melhoria na irrigação afeta apenas o uso consuntivo da água (ET) e a água incorporada no produto. Mas na maioria das vezes afeta o uso de água não consuntivo, ou seja, escoamento e drenagem. Nestes casos, a avaliação precisa da economia real de água requer a quantificação das frações reutilizáveis e não reutilizáveis dos componentes envolvidos (RODRIGUES; PEREIRA, 2009; PEREIRA *et al.*, 2012). Isso não é fácil devido às incertezas na avaliação da fração reutilizável. Esta pode ser utilizada novamente e, portanto, não pode ser considerada uma perda. As questões de produtividade e economia de água tornam-se cada vez mais complexas ao aumentar a escala, do campo cultivado à bacia (KOECH; LANGAT, 2018). Perry (2011) destaca que o contexto

hidrológico local deve ser considerado para afirmar se qualquer redução no uso de água na fazenda economiza água. Essa questão foi abordada em um artigo recente de Grafton *et al.* (2018). Eles reconhecem que as tecnologias de irrigação avançadas podem aumentar a eficiência da irrigação no campo, definida como a proporção entre o volume de água de irrigação usada de forma benéfica no campo (predominantemente, ET dos cultivos e remoção de sal do solo) e o volume total de irrigação aplicado (ajustado para variações de armazenamento no solo). Mas eles também afirmaram que a água economizada em escala de fazenda normalmente não reduz o consumo de água em escala de bacia hidrográfica, pois, a água economizada na parcela pode não retornar para a bacia.

15.4.2 Partição da água de irrigação

Quanto à possibilidade de recuperação, a água usada na agricultura é classificada da seguinte forma (BURT *et al.*, 1997):

(i) Uso consuntivo - é a quantidade total de água absorvida pelas plantas para transpiração e constituição dos tecidos, mais a evaporação da água do solo e da água interceptada pela vegetação. Toda água em trânsito para a atmosfera, pelos processos de evaporação e transpiração (ET) ou que permanece nos tecidos das plantas e nos produtos colhidos (água de constituição) é irre recuperável e se denomina uso consuntivo. Exemplos de usos consuntivos são: evapotranspiração das culturas; evapotranspiração das plantas daninhas; evaporação da água aspergida por aspersores; evaporação de reservatórios, evaporação do solo úmido; água exportada com o produto colhido, etc.

(ii) Uso não consuntivo - é a água que, de alguma forma, transita para fora da área de cultivo, mas não se perde para a atmosfera na forma de vapor. A água de uso não consuntivo pode ser reutilizada na própria área, ou em outra área de jusante na bacia hidrográfica ou retornar à fonte. Está relacionada com a água que drena abaixo da zona radicular, a água que escoam superficialmente e a que infiltra nos canais. Exemplos de usos não consuntivos são: água para lixiviação de sais no perfil do solo; percolação profunda em excesso; escoamento superficial; infiltração em canais e vazamento em tubulações, etc.

Quanto aos benefícios agronômicos, o uso de água na agricultura recebe a seguinte classificação (BURT *et al.*, 1997):

(i) Usos benéficos - uso benéfico de água na agricultura, pressupõe a água consumida para a produção das culturas. Assim, a água consumida para atingir um determinado objetivo agronômico é considerada água benéfica. São exemplos: água consumida no processo de evapotranspiração das culturas, evapotranspiração de plantas benéficas (quebra-ventos, cobertura e proteção do solo, habitat para insetos benéficos); água utilizada para lixiviar o excesso de sais do solo, controle climático, preparação do leito de semeadura, para germinação das sementes, umedecimento do solo com o objetivo de quebrar a crosta superficial e facilitar a emergência das plântulas, água utilizada para aplicação de pesticidas e fertilizantes, etc.

A água armazenada no solo, na zona radicular, após a colheita, não é considerada para uso benéfico, a menos que esteja disponível para culturas subsequentes. Esta água deve ser considerada neutra até que ela deixe a área objeto e siga outro destino. O intervalo de tempo selecionado para a partição da água influencia a magnitude da fração considerada para os vários destinos. Também, o uso da água proveniente da precipitação não é considerado como um uso benéfico da água de irrigação.

(ii) Usos não benéficos - uso não benéfico refere-se à fração da água aplicada que não tem objetivo agrônômico. São exemplos: excesso de percolação profunda em relação à necessária para remoção de sais; excesso de escoamento superficial, evapotranspiração de plantas daninhas, evaporação desnecessária da água na superfície de solo úmido de áreas vizinhas à área irrigada, deriva pelo vento além dos limites da área cultivada. A aplicação de água não é perfeitamente uniforme, e por isso em alguma fração da área irrigada ocorre excesso de água e percolação; todo excesso além da necessidade de irrigação é considerado uso não benéfico.

Os usos não benéficos podem ser considerados razoáveis e não razoáveis. Os usos não benéficos razoáveis são aqueles que podem ser justificados em condições, lugares e momentos particulares. Exemplos são: evaporação de reservatórios, evaporação do solo úmido dentro da área irrigada, alguma evaporação da água aplicada por aspersores, água de lavagem de filtros, alguma percolação decorrente da não uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação e por incertezas no manejo da irrigação, água para satisfazer algum propósito ambiental, água necessária para manter o padrão de qualidade de drenos, perdas que podem ser antieconômicas de serem evitadas, etc. Já os usos não benéficos não razoáveis são aqueles que não podem ser justificados. São exemplos: percolação profunda excessiva; deflúvio superficial excessivo; evaporação de solo úmido irrigado fora dos limites da área cultivada; vazamentos em tubulações; vazamentos e infiltração em canais.

15.4.3 Indicadores de eficiência da irrigação

A partição da água aplicada por irrigação é a base para a definição de certos parâmetros de desempenho, especialmente os indicadores de eficiência. Os diferentes indicadores têm diferentes propósitos e devem ser cuidadosamente analisados. Expressos como porcentagens, eles representam frações do volume de irrigação aplicado destinados a certas funções. É impossível definir alguns indicadores sem especificar o período de tempo e os limites da região analisada. Já outros, pelos seus pressupostos, podem evitar esses problemas.

(i) Eficiência de irrigação

O conceito de eficiência de irrigação foi inicialmente dado por Israelsen (1950). O.W. Israelsen, pioneiro em tecnologia de irrigação, preocupava-se com a quantidade de água aplicada em terras irrigadas nos EUA e desenvolveu diversos parâmetros para caracterizar o desempenho da irrigação e afirmou: com uma determinada quantidade de água desviada de um rio, quanto maior a proporção que é armazenada no solo da zona radicular dos cultivos nas fazendas irrigadas e mantida lá até ser absorvida e transpirada pelas plantas, maior será o rendimento total da safra. Ele então definiu a eficiência da irrigação (EI) como a proporção da água de irrigação consumida pelas plantações de uma fazenda irrigada, ou de um projeto, para a água desviada de um rio ou outra fonte de água natural para o canal, ou canais, do projeto na fazenda. Na forma de equação, ele definiu a eficiência da irrigação como a razão entre a água de irrigação consumida pelas plantações (ET) e desviada de um rio ou outra fonte natural.

A definição de Israelsen permaneceu fundamentalmente inalterada por mais de 40 anos, até que a partir da década de 1970 foi gradativamente modificado e substituído, tanto na literatura quanto na prática. Burt *et al.* (1997) redefiniram EI como sendo a razão entre o volume de irrigação que é benéficamente usado, que deixa os limites da área irrigada na forma de vapor, e o volume total de irrigação aplicado (uso benéfico mais uso não benéfico) [Eq. (1)]:

$$EI = \frac{V_b}{V_a - \Delta S} \times 100 \quad (1)$$

em que, V_b - volume de água de irrigação benéficamente usado; V_a - volume total de irrigação aplicado; ΔS - variação de armazenamento da água de irrigação no solo.

O numerador da Eq. (1) representa os usos benéficos da água de irrigação para múltiplos propósitos, incluindo água para ET, lixiviação de sais, proteção contra geadas, controle de temperatura ambiente, aplicação de fertilizantes e pesticidas, preparação do solo, quebra da crosta superficial do solo para facilitar a emergência, etc. A água que se destina à percolação profunda excessiva, ao escoamento superficial, à deriva pelo vento, à evaporação após ser aspergida no ar e usada pelas plantas daninhas são usos não benéficos e que tendem a reduzir a eficiência de irrigação.

O denominador da Eq. (1) corresponde ao volume total de água de irrigação (usos benéficos + usos não benéficos) que foi aplicado e deixou os limites do campo em um intervalo de tempo especificado (por exemplo, intervalo imediatamente antes de uma irrigação até imediatamente antes da próxima irrigação; ou durante uma estação de cultivo). Se, ao final do período, o volume de água armazenado no solo é o mesmo do início, então a variação de armazenamento da água de irrigação (ΔS) é zero e toda água aplicada deixou o campo por ET, escoamento superficial e subsuperficial, percolação profunda, etc. Dessa forma, a água armazenada temporariamente na zona radicular para uso fora do intervalo de tempo especificado não é contabilizada - nem adicionada ao uso benéfico nem subtraída dele. Ao final de uma safra ΔS na camada que contém o sistema radicular, é, frequentemente, muito pequena, então, para fins de avaliação pode-se considerar igual a zero (JENSEN, 2007).

A EI é definida entre duas datas, geralmente compreendendo o ciclo completo da cultura. É determinada somente a *posteriore* e não pressupõe usos benéficos futuros. Para o intervalo de tempo definido, exige uma avaliação acurada da fração da água de irrigação que foi benéficamente usada. Não exige que o requerimento de água pelas plantas e o uso sejam uniformes em toda a área. Os valores dependem da escolha do intervalo de tempo. O termo "água de irrigação" exclui a água aplicada naturalmente à cultura por precipitação ou ascensão do lençol freático. Também, é possível, sem perda de generalidade, utilizar lâmina de água de irrigação no numerador e no denominador da Eq. (1), entendendo que volume é simplesmente o produto entre lâmina e área (da parcela, do campo ou do projeto). A relação entre EI e usos benéficos e não benéficos de água de irrigação, pode ser feita da seguinte forma: Usos Benéficos + Usos não Benéficos = 100% e Usos não Benéficos = 100 - EI%.

A EI é um indicador de desempenho que tem sido utilizado para quantificar o uso benéfico da água de irrigação e comparar com usos não benéficos. A água é usada benéficamente quando contribui diretamente para a produção agrônômica da cultura. No entanto, devido a restrições físicas, econômicas ou administrativas, e várias demandas ambientais, certo grau de uso não benéfico é geralmente razoável. Outros benefícios para a sociedade podem advir da água de irrigação, como por exemplo, uma fração não usada pelas plantas pode ser usada para a dessedentação da população do campo.

Também, pode ser prudente para um irrigante aplicar alguma quantidade adicional de água que não é diretamente usada pelas culturas. Portanto, é necessário um indicador adicional que incorpora os usos não benéficos razoáveis: os usos que podem não contribuir para a produção agrônômica, mas podem ser justificados em circunstâncias particulares. Solomon e Burt (1999) propuseram um índice de desempenho da irrigação que contempla usos de água benéficos e não benéficos

razoáveis, nomeando-o de sagacidade da irrigação. O termo sagacidade foi empregado no sentido de prudência. O índice de sagacidade IS é definido pela Eq. (2). Não se sugere que IS substitua EI. Com objetivos bem definidos, ambos podem oferecer informações úteis.

$$IS = \frac{V_{br}}{V_a + \Delta S} \times 100 \quad (2)$$

em que, V_{br} é o volume de água de irrigação benéficamente usado mais o volume não benéfico razoavelmente usado.

A eficiência de irrigação, como conceito, tem sido frequentemente mal aplicada ou mal interpretada por falhas na diferenciação entre uso consuntivo e uso benéfico. É falso entender que $(100 - EI) \%$ da água aplicada por irrigação representa a quantidade que é desperdiçada e, portanto, o potencial para conservação ou realocação. Uma $EI = 75\%$ não significa que 25% da água de irrigação aplicada poderia ser conservada e redirecionada para qualquer outra parte ou fim. Como destacam Solomon e Burt (1999), algum grau de uso não benéfico é geralmente razoável, de forma que o potencial para conservação e realocação consiste somente dos usos não benéficos não razoáveis. O parâmetro IS incorpora os usos benéficos e não benéficos razoáveis e permite definir o potencial para conservação e realocação, limitando-o a $(100 - IS) \%$ da água aplicada.

Como se tem destacado, usos não benéficos razoáveis são aqueles que, embora não beneficiam diretamente a produção agrônômica, podem ser justificados sob algumas condições físicas e econômicas. Por exemplo, pequena perda de água em canais que não justifica economicamente o investimento para ser evitada constitui um uso razoável, embora não benéfico. Alguma percolação profunda que decorre da não uniformidade de aplicação de água é inevitável e razoável, embora não benéfica. Da mesma forma, podem ser citadas as perdas de água por evaporação no ar durante a irrigação por aspersão, a água usada para lavagem de filtros em irrigação localizada, etc. O IS pode ser aplicado nas escalas de campo, de fazenda, de distrito, de projeto ou de bacia hidrográfica, em um intervalo de tempo definido, incluindo os conceitos de usos benéficos e usos não benéficos razoáveis.

(ii) Coeficiente de uso consuntivo da irrigação

A definição de EI segundo Israelsen (1950) refere-se claramente à proporção entre água "consumida ou evapotranspirada" e água desviada de uma fonte ou aplicada. Jensen (1993) sugeriu alteração do nome desta razão para coeficiente de uso de consuntivo (ICUC). O ICUC representa a fração da água desviada ou aplicada a um campo, fazenda ou projeto que é convertida em vapor ou consumida. Burt *et al.* (1997) propõe quantificar ICUC pela razão entre o volume de água de irrigação consuntivamente usado e o volume de água de irrigação que deixou o campo, ambos em um intervalo de tempo específico (Eq. 3):

$$ICUC = \frac{V_c}{V_a - \Delta S} \times 100 \quad (3)$$

em que, V_c é o volume de água de irrigação consuntivamente usado (não recuperado).

Da mesma forma que EI, ICUC pode ser usado na escala de campo, de fazenda, de projeto, de distrito de irrigação ou de bacia hidrográfica. Na escala de projeto, por exemplo, a saída total de água de irrigação da área do projeto na forma líquida (por drenagem e escoamento), em um período de tempo especificado, é $100 - ICUC\%$ da água de irrigação suprida ao projeto menos a variação de armazenamento da água de irrigação no solo. O ICUC quantifica a água de irrigação não recuperada (consumida) e $100 - ICUC\%$ quantifica a água não consumida.

15.5 Produtividade da água

15.5.1 Visão geral

Os irrigantes estão sob pressão crescente para garantir a segurança alimentar, bem como a sustentabilidade ambiental e econômica de longo prazo (KOECH; LANGAT, 2018), dois alvos cada vez mais ameaçados pelas mudanças climáticas e pelo aumento da população. O desafio atual é garantir que a gestão da água na agricultura permita lucros razoáveis para o produtor, produção de alimentos, fibras e biocombustíveis suficientes para atender à demanda da população em crescimento, enquanto custos ambientais insustentáveis devem ser evitados (COSGROVE; LOUCKS, 2015; ROCKSTRÖM *et al.*, 2017). Neste contexto, o irrigante é obrigado a tomar decisões eficazes sobre o método e o sistema de irrigação associado, a estratégia de irrigação e o método para programar a irrigação, entre outros fatores relacionados à gestão da água na fazenda. A dificuldade de escolher com sabedoria aumenta quando se valoriza a qualidade da produção, além da quantidade, e no caso de sistemas de cultivo com alta densidade de plantas em que o crescimento excessivo deve ser evitado (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Como consequência, o irrigante deve avaliar o impacto das diferentes opções na produtividade da água e no lucro da fazenda. Para esta tarefa, são necessários indicadores de produtividade da água e do desempenho econômico da irrigação (PEREIRA *et al.*, 2012; LEVIDOW *et al.*, 2014).

Entretanto, não há consenso sobre a definição e adequação de diferentes indicadores e como eles devem ser usados. Em primeiro lugar, irrigantes, ambientalistas e formuladores de políticas geralmente têm visões diferentes sobre o que é um uso eficiente da água na agricultura, e como deve ser melhorado (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Enquanto os irrigantes tentam obter a maior lucratividade possível da fazenda, os ambientalistas enfocam a importância de preservar os recursos hídricos atuais e os formuladores de políticas trabalham para regular a demanda de diferentes setores de consumo de água. Em segundo lugar, a interpretação das conclusões sobre a eficiência do uso da água e produtividade da água, depende da experiência do analista e da escala de análise (MOLDEN *et al.*, 2003). Assim, um agricultor ou agrônomo geralmente considera a drenagem como uma perda, enquanto um hidrólogo trabalhando na escala de bacia pode quantificá-la como um fluxo de água dentro do mesmo sistema, com um impacto desprezível no balanço hídrico da bacia (PERRY, 2011). Em terceiro lugar, a literatura mostra falta de acordo sobre termos e conceitos, o que muitas vezes leva a um uso deficiente dos resultados publicados (PEREIRA *et al.*, 2012; KNOX *et al.*, 2012). Na visão de Perry (2011) tudo isso cria confusão na interpretação dos dados sobre o uso da água na agricultura e restringe a comparação entre diferentes estudos.

Também se tem encontrado falta de consenso quando se trata da produtividade econômica da água. Por exemplo, admite-se que a receita seja dada pelo valor do rendimento, mas não há consenso sobre como definir e calcular os custos necessários para calcular os benefícios. Alguns autores consideram apenas os custos variáveis, enquanto outros também consideram os custos fixos associados ao investimento (MESA-JURADO *et al.*, 2010; HELLEGERS *et al.*, 2010; EXPÓSITO; BERBEL, 2016) e outros recomendam incluir os custos de oportunidade (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020), que são especialmente relevantes ao avaliar a lucratividade de pomares de árvores frutíferas e outras culturas perenes. O uso de funções de produção para avaliar a produtividade econômica da água fornece uma visão mais ampla do que apenas um conjunto de indicadores de uso da água (ENGLISH, 1990; FRIZZONE, 2004). Tanto os custos de oportunidade quanto as funções de produção, são desconsiderados em muitas análises

econômicas sobre o impacto da irrigação. Como resultado, as estimativas dos benefícios de diferentes estudos são dificilmente comparáveis.

As estatísticas de irrigação demonstram o importante papel da agricultura irrigada no mundo e a necessidade de aumentar a eficiência de uso da água na atividade agrícola. Embora a espécie cultivada, o genótipo, as condições de solo e os fatores climáticos são de vital importância para a eficiência de uso da água (MBAVA *et al.*, 2020), a disponibilidade de água é frequentemente o elemento crítico mais importante na agricultura. Aumentar a eficiência do uso da água na fazenda requer decisões sábias sobre o sistema de irrigação, estratégias de irrigação e método para programar a irrigação, entre outros fatores relacionados ao gerenciamento da água. Desde o início dos anos 2000, a abordagem da produtividade física da água (WFP) tem sido amplamente usada para resolver esse problema. Nos sistemas de produção agrícola a WFP é usada para definir a relação entre produção comercial das culturas e a quantidade de água consumida nesta produção (ET), e tem servido como um indicador para quantificar o impacto dos calendários de irrigação com relação ao manejo da água e o desempenho econômico da irrigação.

15.5.2 Indicadores de produtividade da água

Os fisiologistas de plantas definem a eficiência de uso da água (WUE) na escala de planta como a razão entre a taxa de produção de biomassa obtida e a taxa de transpiração (VIETS, 1962). Os agrônomos costumam usar definição semelhante, com a diferença de considerar a produção comercial, em vez taxa de produção de biomassa no numerador, e a água aplicada no denominador em vez da taxa de transpiração. O termo é impróprio porque não é estritamente uma eficiência, mas uma medida da quantidade de carbono fixada pelas plantas por unidade de água transpirada. Esta proporção, no entanto, está mais relacionada à produtividade da água do que com a eficiência. O termo produtividade, refere-se à razão entre o produto obtido e o insumo utilizado (HEYDARI, 2014) e, ao contrário da eficiência, as unidades do numerador são diferentes das do denominador. Isso está de acordo com o conceito de produtividade da água da cultura (WFP) introduzido por Molden (1997), que ganhou ampla aceitação. Há um consenso sobre o numerador de WFP ser o rendimento comercial, mas a definição e os componentes do denominador diferem entre os autores. Alguns consideram apenas a água transpirada pela cultura (BOUMAN, 2007), mas a maioria dos autores inclui tanto a água evaporada do solo quanto a transpirada pela cultura, ou seja, ET (SINCIK *et al.*, 2008; BLATCHFORD *et al.*, 2018).

Considerando que a produção de matéria seca (fotossíntese) e transpiração estão relacionadas aos processos de difusão de CO₂ e de água, Viets (1962) definiu WUE pela Eq. (4):

$$WUE = \frac{\text{Taxa de produção de matéria seca}}{\text{Taxa de transpiração}} \rightarrow \frac{y \text{ (kg ha}^{-1}\text{d}^{-1}\text{)}}{t \text{ (mm dia}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

Howell *et al.* (1992) derivaram uma expressão para WUE para ser utilizada em escala de campo [Eq. (5)]. Embora o intento tenha sido sua utilização em escala de campo, seu uso é complexo, mas é capaz de ilustrar os problemas comuns encontrados na avaliação acurada de WUE a partir de medidas de campo. A Eq. (5) representa todos os mecanismos agrônômicos e de engenharia para aumentar WUE (WALLACE; BATCHELOR, 1997). Estes são: (i) aumentar o índice de colheita através do melhoramento genético da cultura ou do manejo; (ii) reduzir a taxa de transpiração pela seleção de espécies melhoradas, seleção de variedades, ou melhoramento de plantas; (iii) maximizar a produção de matéria seca pela melhoria da fertilidade do solo, controle

de doenças e pragas e otimização de plantio; (iv) aumentar o componente T (transpiração) do balanço hídrico à custa da redução de outros componentes. O componente (iv) significa aumentar T pela redução de E, através do uso de resíduos na superfície do solo, cultivo mínimo do solo, cobertura superficial da superfície do solo, irrigação por sulcos alternados nas entrelinhas de plantio ou utilizar irrigação localizada; reduzir D, evitando o molhamento excessivo da zona das raízes e minimizando a necessidade de lixiviação para o controle da salinidade; reduzir o escoamento superficial utilizando resíduos de colheita e técnicas de conservação do solo e evitar a compactação do solo e a formação de crostas superficiais; impor gradualmente deficits hídricos no solo; utilizar variedades com sistemas radiculares mais profundos. Embora ambos os elementos (i) e (ii) são biologicamente controlados e de difícil manipulação, podem existir no campo algumas variabilidades que podem ser controladas. O elemento (iii) é o foco da pesquisa atual de agricultura de precisão para melhorar os rendimentos relativos dos insumos, aplicando-os no tempo e no local necessário. O elemento (iv) é a base de quase todas as tecnologias de conservação de água, para melhorar a captação das chuvas e as tecnologias de irrigação para evitar ou minimizar as perdas na aplicação.

$$WUE = \frac{(HI \cdot DM)}{\left\{ T(1 + WC) \left[1 + \frac{E}{(PE + IR + \Delta S - D - R - E)} \right] \right\}} \quad (5)$$

em que: HI - índice de colheita (kg de produção econômica seca por kg de matéria seca); DM - massa de matéria seca na parte aérea ou total, incluindo raízes, por unidade de área (deve ser a mesma utilizada para calcular HI), kg ha⁻¹; T - transpiração, mm; WC - conteúdo de água padrão contido no produto, usado para expressar a produção econômica (uma fração à base de massa úmida - 0,13 a 0,14 para cereais); PE - precipitação efetiva, mm; IR - quantidade de irrigação, mm; ΔS - depleção de água no solo (é negativo se houver acréscimo de água no solo), mm; D - drenagem abaixo da zona radicular (é negativo para ascensão capilar), mm; R - escoamento superficial (é negativo quando representar entrada na área), mm; E - evaporação, mm.

A Eq. (5) ilustra os problemas comuns encontrados para avaliar WUE com exatidão a partir de medições de campo. PE e IR podem contribuir com o escoamento superficial (R); estimativas de precipitação efetiva (PE) são difíceis em alguns casos. Da mesma forma, PE e IR podem contribuir com a percolação além da zona das raízes, resultando dificuldades na caracterização de D. A depleção de água no perfil do solo (ΔS) pode ser medida, mas normalmente só pode ser determinada em pontos discretos no campo. A distribuição estocástica de PE no campo é muitas vezes ignorada, da mesma forma que a distribuição de IR que é conhecida por ser mais previsível, ainda assim é probabilística. Todas essas variações espaciais causam impacto na ET e em ΔS. A fim de obter estimativas confiáveis e reprodutíveis para PE, IR, R, D e ΔS para estimar ET, são necessárias medidas cuidadosas em parcelas em nível. Estas técnicas, utilizadas em experimentos, podem ser impraticáveis em muitas situações de campo.

Na prática diária de irrigação, a produtividade da água (WFP) é um termo mais relevante que WUE cujo significado depende da aplicação. Nos sistemas de produção agrícola, a WFP é usada para definir a relação entre produção comercial das culturas e a quantidade de água consumida nessa produção (ET), e tem servido como um indicador para quantificar o impacto dos calendários de irrigação com relação ao manejo da água. Dessa forma, a produção total de biomassa (matéria seca) é transformada em produção comercial da cultura (VAZIFEDOUST *et al.*, 2008; PERRY *et al.*, 2009) e define-se WFP com respeito à ET (WFP_{ET}), conforme Eq. (6). A WFP_{ET} constitui a chave para avaliação das estratégias de irrigação com *deficit* (GEERTS; RAES, 2009).

$$WFP_{ET} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura (kg)}}{\text{Evapotranspiração da cultura (m}^3\text{)}} \quad (6)$$

Na escala de campo, o uso de água representado no denominador da Eq. (6) é difícil de ser determinado com precisão. Assim, em algumas situações, outros substitutos para WFP são usados por muitos profissionais de irrigação e, como consequência, resultam diferentes valores. Se a quantidade total de água aplicada [irrigação (IR) + precipitação efetiva (PE)] é considerada como água consumida pela cultura, então a Eq. (6) pode ser usada para determinar a produtividade física da água (WFP_{IR+PE}). O denominador da Eq. (6) é um substituto do uso de água para se obter o rendimento comercial correspondente. Sob condições de muito baixa precipitação, como em regiões áridas e semiáridas, pode-se converter WFP_{IR+PE} em WFP_{IR} [Eq.(7)]. Nesse caso, negligencia-se a variação do armazenamento de água no solo durante o ciclo da cultura, a percolação, a ascensão capilar e o escoamento superficial. Muitos profissionais usam as Equações (7) e (8) com a finalidade de identificar diferenças entre os métodos de irrigação e manejo da irrigação.

$$WFP_{IR+PE} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura (kg)}}{\text{Volume de irrigação + precipitação (m}^3\text{)}} \quad (7)$$

$$WFP_{IR} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura (kg)}}{\text{Volume de irrigação (m}^3\text{)}} \quad (8)$$

Observa-se relativo consenso sobre o numerador de WFP ser o rendimento comercial. A biomassa total seca ou fresca ou produto colhido pode ser usado no numerador, expresso em termos físicos ou econômicos. No entanto, como os valores econômicos de diferentes produtos agrícolas não são os mesmos, a produtividade da água deve ser definida economicamente (HEYDARI, 2014). Por outro lado, algumas culturas são de base úmida, outras de base seca, algumas culturas como alfafa e milho podem ser reportadas em ambas as bases e para outras o produto final é mais importante (por exemplo, cana-de-açúcar, beterraba açucareira, arroz em casca, etc.). Já a definição e os componentes do denominador diferem entre os autores. Alguns consideram apenas a água transpirada pela cultura (BOUMAN, 2007), mas a maioria inclui tanto a água evaporada do solo quanto a transpirada pela cultura. Pereira *et al.* (2012) sugeriram o uso do volume total de água envolvido na produção, isto é, além da ET somam-se a fração de lixiviação, quando houver risco de sal na zona radicular, e o uso não benéfico de água, ou seja, a água que é percolada, escoada do local de cultivo e derivada pelo vento quando a irrigação é por aspersão (isto é, volume total de água aplicada).

O conceito de produtividade da água pode se referir à produção física ou ao seu valor econômico (RODRIGUES; PEREIRA, 2009; HEYDARI, 2014). Um termo adequado para o último é a produtividade econômica da água (WEP), que se refere à razão entre produtos e insumos em termos monetários. Para culturas com baixos custos de investimento, por exemplo cereais, a produtividade econômica bruta da água de irrigação ($WEPB_{IR}$), que considera a margem bruta (receita bruta menos os custos variáveis) é aceitável [Eq. (9)] (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020):

$$WEPB_{IR} = \frac{\text{Margem bruta (\$ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Volume de irrigação (m}^3\text{ha}^{-1}\text{)}} \quad (9)$$

em que o denominador representa apenas o uso da água aplicada por irrigação.

No caso de culturas lenhosas e outras culturas que requerem substancial investimento desde o início, a produtividade econômica líquida da água ($WEPL_{IR}$) é um

indicador mais adequado (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020), pois considera a margem líquida em vez da margem bruta, ou seja, inclui os custos variáveis e os fixos [Eq. (10)]:

$$WEPL_{IR} = \frac{\text{Margem líquida } (\$ \text{ ha}^{-1})}{\text{Volume de irrigação } (\text{m}^3 \text{ ha}^{-1})} \quad (10)$$

Ainda assim, nem $WEPB_{IR}$ nem $WEPL_{IR}$ consideram os custos de oportunidade, definidos como os benefícios perdidos ao longo da vida útil da cultura a uma determinada taxa de juros. Uma análise econômica adequada deve considerar os custos de oportunidade. Portanto, a produtividade econômica da água total (WEP_{IR+PE}), definida pela Eq. (11) é recomendada:

$$EP_{IR+PE} = \frac{\text{lucro } (\$ \text{ ha}^{-1})}{\text{Volume de irrigação} + PE (\text{m}^3 \text{ ha}^{-1})} \quad (11)$$

Se apenas o volume de irrigação for considerado no denominador, tem-se a produtividade econômica da água de irrigação (WEP_{IR}).

O lucro no numerador da Eq. (11), é definido como a receita bruta menos a soma dos custos fixos, variáveis e de oportunidade. Então WEP_{IR+PE} e WEP_{IR} são adequados para tomar decisões sobre o manejo da irrigação de culturas lenhosas (FERNÁNDEZ *et al.*, 2020). Ressalta-se que o tempo de vida da cultura afeta o valor WEP resultante, devido ao seu impacto nos custos fixos e de oportunidade. Isso é particularmente relevante para pomares de árvores frutíferas. Tanto WEP_{IR+PE} quanto WEP_{IR} são particularmente úteis para irrigantes que precisam tomar decisões sobre como gerenciar a irrigação da maneira mais lucrativa, ou seja, quando a meta de produção é aumentar a lucratividade e não a produtividade física da água. Entretanto, um cálculo preciso do WEP_{IR+PE} e WEP_{IR} não pode ser feito antes do final da colheita, quando a receita e os custos ainda não são conhecidos. A receita é dada pelo rendimento e pelo valor de mercado e, para o cálculo dos custos totais, devem ser conhecidos os custos fixos, variáveis e de oportunidade (ALCON *et al.*, 2013). Isso limita a utilização de WEP_{IR+PE} e WEP_{IR} para a tomada de decisão na irrigação, uma vez que a avaliação econômica deve ser feita antes do início da temporada de irrigação. O desafio é maior quando o valor do rendimento depende da qualidade do produto, e quando o preço de alguns insumos, como energia, fertilizantes e defensivos, varia de uma temporada para outra e mesmo durante o período de crescimento.

15.6 Fatores que afetam a produtividade da água

Os fatores que influenciam o rendimento das culturas (numerador das equações de WFP) e a água aplicada (denominador das equações de WFP) afetam a produtividade da água, e podem ser agrupados em diferentes categorias (ALI; TALUKDER, 2008; WALLACE; BATCHELOR, 1997).

Cultivar: as plantas perdem grande quantidade de água quando abrem seus estômatos para capturar CO_2 do ar não saturado. Através da cavidade sub-estomática o vapor difunde para a atmosfera, enquanto que o CO_2 segue caminho oposto. A modelagem matemática destes dois processos opostos de difusão, mostra que WFP é uma função que depende fortemente dos gradientes de concentração de CO_2 e de vapor d'água entre o exterior e o interior da folha (ALI *et al.*, 2007). Estes dois fluxos opostos são regulados por estômatos. Portanto, o comportamento estomático irá determinar a WFP de uma determinada espécie ou cultivar. É sabido que as plantas C_4 têm maior WFP que plantas C_3 . Dentro das plantas C_3 , muitos relatos têm mostrado que genótipos podem ser selecionados para maior WFP, de acordo com a discriminação isotópica do

carbono, em função do gradiente de concentração de CO₂ entre o interior e o exterior da folha.

Irrigação: muitas formas de conservação de água têm sido investigadas na agricultura irrigada. A irrigação com *deficit* e a irrigação por gotejamento têm mostrado que podem aumentar WFP em escala de campo (ALI *et al.*, 2007; JALOTA *et al.*, 2006; FERERES; SORIANO, 2007; GEERTS; RAES, 2009). Em geral, o manejo da irrigação com *deficit* estabelece uma relação de troca: menor produção para maior WFP. Então surge a pergunta se é possível aumentar WFP sem redução significativa de produtividade. Existem exemplos onde a produção de grãos, com grande proporção da biomassa total, mostra uma relação parabólica com retornos decrescentes em função do aumento da quantidade de irrigação. Isto sugere que, quando a quantidade de água aplicada é grande, o crescimento vegetativo excessivo pode levar a uma menor atividade de raízes, estrutura do dossel pouco saudável e um menor índice de colheita (razão entre a produção econômica e a fitomassa seca da parte aérea, ou total). Isso significa que a elevada produção de biomassa, decorrentes de um excesso de água, não levará a um alto valor de WFP, definida como a produção econômica por unidade de volume de água aplicada.

O objetivo é aumentar WFP através do aumento do rendimento econômico, pela limitação do fornecimento de água para aumentar o índice de colheita. Pesquisas do início dos anos 2000 têm mostrado que em algumas condições, a produção econômica de grãos pode ser melhorada reduzindo a quantidade de água aplicada à cultura (YANG *et al.*, 2000, 2001, 2002; FRIZZONE, 2004), principalmente através do aumento do índice de colheita que tem se mostrado componente chave para melhorar a WFP (EHDAIE; WAINES, 1993). Sob condições de *deficit* gradual e crescente, as culturas apresentam maiores taxas fotossintéticas do que sob condições de deficits severos e rápidos. No primeiro caso, a regulação osmótica aumenta até certo ponto, enquanto no segundo permanece constante (ALI; TALUKDER, 2008). No *deficit* gradual o ajustamento osmótico permite o crescimento e a manutenção da fotossíntese, e a adaptação estomática (VAZIFEDOUST *et al.*, 2008).

Quanto ao método de irrigação, há muitas razões para melhorar a tecnologia de irrigação. Na escala de campo, o potencial para aumento da proporção de água disponível na entrada da parcela que contribui com a transpiração da cultura é a fonte mais provável de aumento das receitas. Várias questões devem ser analisadas em cada situação para avaliar o impacto mais amplo de aumentar a transpiração. O aumento ou redução da evaporação é altamente dependente do método de irrigação, do manejo e da cultura. Por exemplo, com irrigação por gotejamento subsuperficial a evaporação é minimizada. Já para muitas culturas arbóreas, a irrigação por gotejamento superficial pode aumentar a evaporação porque parte da superfície do solo está molhada com bastante frequência. As diferenças específicas dependem da frequência relativa de irrigação e da fração de área de solo molhado.

Há décadas de experiência com quase todas as tecnologias de irrigação disponíveis. No entanto, as surpresas constituem regra mais do que exceção, quando se aplica pela primeira vez uma nova tecnologia. Tecnologias aparentemente promissoras, simplesmente não são apropriadas. Embora seja desejável que a irrigação melhore a produção no campo, por muitas razões (ambiental, qualidade de colheita, produtividade das culturas, consumo de energia, etc.), é difícil encontrar a combinação mais adequada de modernização sustentável entre equipamento e manejo da irrigação para um local.

Fatores referentes ao solo: a perda de água por evaporação da superfície do solo tem papel importante no crescimento das plantas durante a germinação e

estabelecimento de plântulas e, também, durante outros períodos de crescimento (PERRY *et al.*, 2009). A textura do solo e o teor de matéria orgânica determinam a capacidade de armazenamento de água do solo e as propriedades de disponibilidade. A rápida secagem do solo não proporciona oportunidade para regulação e ajustamento osmótico e, portanto, afeta a produção das culturas e a WFP. O estado nutricional da cultura jovem, especialmente quanto ao nitrogênio, pode afetar significativamente a taxa de desenvolvimento da área foliar e, conseqüentemente, a evaporação do solo. A matéria orgânica no solo interage com outros nutrientes e aumenta a atividade microbiana.

Fatores agronômicos: fatores agronômicos que afetam a WFP são época de semeadura, uniformidade de estabelecimento da cultura, utilização de herbicidas e o padrão do cultivo anterior. A WFP depende não só da forma como a cultura é manejada durante seu ciclo, mas também de como é ajustada ao manejo da fazenda, tanto no espaço quanto no tempo (WALLACE; BATCHELOR, 1997; ALI *et al.*, 2005).

Através de um melhor ajuste no tempo das fases de desenvolvimento vegetativo e de floração, pode-se garantir a época ideal de colheita e obter vantagens do clima para programar o plantio da próxima safra, facilitando bom estabelecimento da cultura. Qualquer técnica que facilita o desenvolvimento e permite uma rápida cobertura da superfície do solo pela cultura, reduzindo o estabelecimento de ervas daninhas, e que permita reduzir a velocidade do vento pode, na maioria das vezes, aumentar a competitividade da cultura e a WFP (COOPER; GREGORY, 1987). Entre as práticas que contribuem especialmente para esses fatores estão a semeadura precoce, a seleção de variedades com crescimento precoce, adubação adequada, população de plantas adequada e redução do espaçamento (GREGORY, 1991).

Dentro do conceito de melhoria da WFP, a água transpirada pelas plantas deve aumentar em relação à evaporação da superfície do solo (PERRY *et al.*, 2009). O manejo do solo e da palha pode influenciar o balanço de água no solo, afetando a infiltração, o armazenamento e as perdas de água por evaporação da superfície do solo. Esses efeitos combinados podem afetar a quantidade de água disponível para a cultura. O escoamento superficial pode ser bastante reduzido por uma boa cobertura de palha. A cobertura da superfície do solo com palha e matéria orgânica impacta a resposta das plantas em termos de aumento do crescimento e da produção, e oferece oportunidades para melhorar a WFP. O encrostamento da superfície de solos com estruturas deficientes, profundidade de semeadura irregular e uso de sementes de má qualidade podem levar a grandes falhas na cobertura vegetal.

Fatores de engenharia: uma importante restrição ao uso eficiente da água está associada com sua medida e quantificação. Medições e registros de dados de vazão, pressão do sistema, variáveis de clima são raros e com erros potenciais. A determinação correta da quantidade de água requerida pela cultura em períodos específicos do seu desenvolvimento é difícil, se não impossível, para muitos irrigantes. Sem a previsão da quantidade de irrigação definida como objetivo, é improvável que os agricultores apliquem a quantidade de água necessária (BURTON *et al.*, 1999). Dado o número e a natureza das variáveis que necessitam ser conhecidas (umidade do solo na capacidade de campo, conteúdo de água no solo em um dado momento, profundidade das raízes, vazão disponível, vazão aplicada, etc.) não é surpreendente que a eficiência de aplicação e a WFP para a maioria dos sistemas de irrigação sejam relativamente baixos - como poderia ser diferente?

Fatores humanos: fatores humanos influenciam o uso da água de irrigação na agricultura. Hábitos, preferências, tradições e nível de aversão ao risco são alguns elementos importantes. Em geral, existe certo grau de desconfiança quanto às

inovações tecnológicas e as tecnologias já utilizadas são mantidas, e suas inconveniências são tacitamente aceitas. O nível educacional do agricultor pode influenciar decisivamente no sucesso da irrigação. Agricultores de melhor formação tecnológica podem contribuir com o uso eficiente da água e superar as expectativas de desempenho dos sistemas de irrigação. Ao contrário, mesmo os sistemas de elevado nível tecnológico podem não corresponder às expectativas quando os agricultores não assimilam princípios básicos da operação desses sistemas.

Aversão ao risco é o comportamento normal de qualquer indivíduo. Embora os agricultores não usem o rigor das análises econômicas para tomarem decisão sobre a quantidade de irrigação, muitas vezes são capazes de desenvolver estratégias intuitivas para se protegerem do risco. Essas estratégias frequentemente estão relacionadas com o aumento da quantidade de irrigação aplicada (FRIZZONE, 2004). Tem-se observado que maiores riscos econômicos ocorrem para menores quantidades de água aplicada (irrigação com *deficit*) para um grande número de culturas. Neste caso, uma decisão racional do agricultor não escolheria livremente a irrigação com *deficit*, pois menores riscos estão associados à aplicação de maiores lâminas de água.

Fatores econômicos: fatores econômicos podem influenciar o nível ótimo de WFP. Às vezes, grandes custos adicionais são envolvidos no aumento da WFP, por exemplo, o investimento em sistemas de aspersão de alta tecnologia, gotejamento e microaspersão. Devem estar incluídos aqui os custos fixos e operacionais envolvidos em uma possível mudança de sistema de irrigação. Os benefícios incluem a água economizada mais o aumento da produção agrícola (se houver). O revestimento de canais de irrigação também envolve uma quantidade considerável de custo fixo, que muitas vezes não pode ser suportado pelos agricultores. A adaptabilidade de qualquer padrão de cultivo depende da sua rentabilidade, pois, os agricultores respondem às regras do mercado buscando o maior retorno por unidade de terra (quando a terra é restrita) ou por unidade de volume de água aplicado (quando a água é restrita) (FRIZZONE, 2004).

15.7 Técnicas para aumentar a produtividade da água

Há uma ampla gama de opções disponíveis para melhorar a eficiência da irrigação na escala de campo (WALLACE; BATCHELOR, 1997; PASSIOURA, 2006; ALI; TALUKDER, 2008). O manejo deficiente da irrigação é citado como a causa mais frequente do uso ineficiente da água em projetos de irrigação. Poucas das opções listadas abaixo resultarão aumento significativo na eficiência se a gestão da irrigação for de baixo padrão. As tentativas de melhorar a eficiência da irrigação e a WFP que são centradas unicamente em uma solução tecnológica, agrônômica ou institucional raramente são bem-sucedidas.

Agrônômicas: (i) adotar sistema de cultivo que possibilita melhor aproveitamento da precipitação ou reduz a evaporação - uso de resíduos de culturas na superfície do solo; escarificação profunda ou subsolagem para melhorar a infiltração da água; usar técnicas de conservação de solo e água; reduzir o espaçamento entre plantas para promover rápida cobertura do solo e reduzir a evaporação, (ii). adotar sistema de rotação de culturas e selecionar sequência de cultivos para reduzir a infestação de pragas, doenças e plantas daninhas, (iii) introduzir variedades de maior rendimento, (iv) adotar estratégias de cultivo que maximizam a área cultivada durante os períodos de baixo potencial de evaporação e períodos de alta pluviosidade, (v) melhorar a fertilidade do solo - solos com boa fertilidade propiciam maior desenvolvimento do sistema radicular, resultando melhor aproveitamento da água e, conseqüentemente, maior WFP (o manejo do nitrogênio é um dos principais fatores para atingir maior produtividade

das culturas e atingir maior WFP em condições de *deficit* hídrico); aplicação de matéria orgânica no solo e uso de adubação verde (o cultivo e a incorporação de algumas leguminosas ao solo melhora a estrutura e aumenta a capacidade de armazenar água e nutrientes), (vi) melhoramento genético - selecionar genótipos que respondem à irrigação para aumentar a WFP, que proporcionam alto índice de colheita e que tenham alta eficiência de transpiração (reduzir a transpiração sem prejuízo da fotossíntese), e (vii) usar estratégias avançadas de cultivo que maximizam a área cultivada durante os períodos de menor demanda de água ou quando a chuva apresentar maior probabilidade de ocorrência.

Engenharia: (i) melhorar a uniformidade de distribuição da água de irrigação, (ii) usar estruturas para conter e armazenar água de chuva, (iii) usar programas de conservação, manutenção e reparos dos sistemas de irrigação e das estruturas hidráulicas para reduzir riscos de falhas e perdas de água, (iv) na irrigação por sulcos, utilizar aplicação de água com vazão intermitente, (v) utilizar sistema de reúso da água escoada no final das parcelas de sistemas de irrigação por superfície, (vi) projetar sistemas de tratamento e reúso de águas servidas na fazenda, (vii) modernizar e otimizar os sistemas de irrigação (os aspectos técnicos de modernização incluem manejo da água, sistema de funcionamento e melhoria das estruturas e dos equipamentos), e (viii) utilizar técnicas de irrigação que reduzam a fração de área molhada.

Manejo: (i) promover irrigações com deficits pequenos a moderados para possibilitar a extração de águas pelas plantas em camadas mais profundas do solo, (ii) adotar sistemas de programação da irrigação baseados na demanda da cultura, via monitoramento da água no solo ou por monitoramento da evapotranspiração, (iii) realizar irrigações em horários de menor intensidades de radiação solar e de baixa velocidade dos ventos para reduzir perdas por evaporação e deriva, ou utilizar quebra-ventos para reduzir o efeito dos ventos, (iv) realizar irrigações pela manhã, nos horários em que os estômatos das plantas estão abertos, para aumentar o tempo de oportunidade de aproveitamento da água pelas plantas e reduzir a oportunidade de percolação profunda, especialmente em solos arenosos, (v) minimizar a salinidade na zona radicular das culturas, e (vi) melhorar o uso e a gestão de águas salinas e residuais.

Institucionais: (i) introdução de sistema de tarifação de água e estruturas legais para fornecer incentivos para o uso eficiente da água e penalidades para o uso ineficiente, (ii) introdução da gestão integrada da água na bacia, (iii) fomentar a educação e a formação do usuário para aprender técnicas modernas de irrigação e (iv) estimular a assistência técnica e a difusão de conhecimentos.

Econômicos: (i) em regiões onde a precipitação é significativa, utilizar sistemas de irrigação de menor investimento inicial, (ii) realocar água de cultivos de menor valor econômico para cultivos de maior valor econômico, e (iii) quando a disponibilidade de terra é restrita e a água é relativamente irrestrita, utilizar irrigação para maximizar a renda por unidade de área e, quando a água é restrita e a terra é relativamente irrestrita, irrigar para maximizar a renda por unidade de volume de água.

15.8 Considerações finais

A escassez e a competição por água são questões de crescente preocupação, assim como a escassez potencial de alimentos. Essas questões se cruzam tanto no setor agrícola quanto em todos os setores que usam água. A irrigação é de longe o maior usuário de água na maioria dos países com escassez de água, e está sob pressão para reduzir o uso (para liberar água para outros setores, incluindo o meio ambiente) e utilizar a água de forma mais produtiva para atender às demandas de alimentos e fibras.

A terminologia para tal análise deve ser inequívoca entre os setores para que as intervenções e seus impactos sejam devidamente compreendidos. Para o setor de irrigação, essa terminologia é apresentada, com base em publicações atuais. Implicações para uma melhor compreensão das oportunidades para aumentar a produtividade física da água foram revisadas e discutidas, demonstrando a necessidade de uma contabilidade precisa da água. A busca por alto valor para a produtividade física da água é um desafio importante para regiões com escassez hídrica. No entanto, existem ambiguidades nas terminologias e definições, especialmente quando são usadas para debates, visando planejamento e tomada de decisão em irrigação.

O termo “aumentar a produtividade da água” implica como se pode melhorar de forma eficaz o resultado ou o rendimento de uma cultura com a água atualmente em uso, ou com menos água. A resposta é dada em três níveis: (i) transpirar a maior parte da água fornecida, minimizando a evaporação, (ii) trocar água transpirada por CO₂ mais eficientemente na produção de biomassa, e (iii) converter a maior parte da biomassa em produção econômica. Muitas tecnologias para melhorar a produtividade da água e o manejo dos recursos hídricos escassos estão disponíveis. Entre as técnicas mais promissoras e eficientes estão a irrigação com *deficit* para otimizar a produtividade física da água, e o aproveitamento de água para melhorar o rendimento agrícola em ambiente seco. No entanto, a melhoria da produtividade da água exige que se explore não só o manejo da água, como também de outros fatores, como uso de cultivares melhorados, manejo da fertilidade do solo e práticas culturais que influenciam na produtividade.

Referências

- ALCON, F.; EGEA, G.; NORTES, P.A. Financial feasibility of implementing regulated and sustained deficit irrigation in almond orchards. **Irrigation Science**, v.31, p.931-941, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0369-6>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ALI, M.H.; HASSANUZZAMAN, M.; BHUIYA, S.H.; KHANAM, F. Evaluation of agro-climatic condition for rice cultivation in different regions of Bangladesh. **Bangladesh Journal of Environmental Science**, v.11, n.1, p.16-21, 2005.
- ALI, M.H.; HOQUE, M.R.; HASSAN, A.A.; KHAIR, A. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat. **Agricultural Water Management**, v.92, p.151-161, 2007.
- ALI, M.H.; TALUKDER, M.S.U. Increasing water productivity in crop production – A synthesis. **Agricultural Water Management**, v.95, p.1201-1213, 2008.
- ARTHINGTON, A.H.; BHADURI, A.; BUNN, S.E.; JACKSON, S.E.; THARME, R.E.; TICKNER, D.; YOUNG, B.; ACREMAN, M.; BAKER, N.; CAPON, S.; HORNE, A.C.; KENDY, E.; MCCLAIN, M.E.; POFF, N.L.; RICHTER, B.D.; WARD, S. The Brisbane declaration and global action agenda on environmental flows. **Frontiers Environmental Science**, v.6; n.45, p.2-15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BLATCHFORD, M.L.; KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W.M.G.; NOURI, H. From global goals to local gains - a framework for crop water productivity. **International Journal of Geo-Information**, v.7, n.414, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi7110414>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BOUMAN, B.A.M. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales. **Agricultural Systems**, v.93, n.1-3, p.43-60, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.004>. Acesso em: 29 mar. 021.
- BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A.; EISENHAUER, D.E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.123, n.6, p.423-442, 1997.

- BURTON, M.A.; KIVUMBI, D.; EL-ASKARI, K. Opportunities and constraints to improving irrigation water management: Foci for research. **Agricultural Water Management**, v.40, n.1, p.37-44, 1999.
- COOPER, P.J.M.; GREGORY, P.J. Soil water management in the rainfed farming systems of the Mediterranean region. **Soil Use Management**, v.3, p.57–62, 1987.
- COSGROVE, W.J.; LOUCKS, D.P. Water management: current and future challenges and research directions. **Water Resource Research**, v.51, p.4823–4839, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DEHGHANIPOU, A.H.; SCHOUPS, G.; ZAHABIYOUN, B.; BABAZADEH, H. Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106353, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.10>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- DUNN, S.M.; STALHAM, M.; CHALMERS, N.; CRABTREE, B. Adjusting irrigation abstraction to minimise the impact on stream flow in the east of Scotland. **Journal of Environment Management**, v.68, n.1, p.95–107, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00006-9). Acesso em: 29 mar. 2021.
- EHDAIE, B.; WAINES, J.G. Variation in water-use efficiency and its components in wheat. I. Well-watered pot experiment. **Crop Science**, v.33, p.294–299, 1993.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. I: Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.116, n.3, p.399-412, 1990.
- EXPÓSITO, A.; BERBEL, J. Microeconomics of deficit irrigation and subjective water response function for intensive olive groves. **Water**, v.8, n.254, p.1-10, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w8060254>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- FERERES, E.; SORIANO, A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147–159, 2007. DOI 10.1093/jxb/erl165.
- FERNÁNDEZ, J.E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNADEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M.V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural Water Management**, v.237, n.106074, 2020. DOI 10.1016/j.agwat.2020.106074.
- FRIZZONE, J.A. Otimização do uso da água na agricultura irrigada: Perspectivas e desafios. **Engenharia Rural**, v.15, n.1, p.37-56, 2004.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dray areas. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1275 - 1284, 2009.
- GRAFTON, R.Q.; WILLIAMS, C.J.; PERRY, C.J.; MOLLE, F.; RINGLER, C.; STEDUTO, P.; UDALL, B.; WHEELER, S.A.; WANG, Y; GARRICK, D.; ALLEN, R.G. The paradox of irrigation efficiency. **Science**, v.361, n.6404, p.748- 750, 2018.
- GREGORY, P.J. Concepts of Water-Use Efficiency. In: HARRIS, H.C.; COOPER, P.J.M.; PALA, M. (Ed.). *Soil and Crop Management for Improved Water-use Efficiency in Rainfed Areas*. ICARDA, Aleppo, p.9-20, 1991.
- HELLEGERS, P.J.G.J.; SOPPE, R.; PERRY, C.J.; BASTIAANSEN, W.G.M. Remote sensing and economic indicators for supporting water resources management decisions. **Water Resource Management**, v.24, p.2419–2436, 2010. DOI 10.1007/s11269-009-9559-2.
- HEYDARI, N. Water productivity in agriculture: challenges in concepts, terms and values. **Irrigation and Drainage**, v.63, n.1; p.22–28, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.1816>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- HOWELL, T.A; CUENCA, R.H; SOLOMON, K.H. Crop yield response. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Eds.). *Management of Farm Irrigation Systems*. St. Joseph. **American Society of Agricultural Engineers**, p.93-122, 1992.

- ISRAELSEN, O.W. **Irrigation principles and practices**, New York: Wiley and Sons, 471p., 1950.
- JÄGERMEYR, J.; PASTOR, A.; BIEMANS, H.; GERTEN, D. Reconciling irrigated food production with environmental flows for Sustainable Development Goals implementation. **Nature Communications**, v.8, n.9, p.1-9, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms15900.15900>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- JALOTA, S.K.; SOOD, A.; CHAHAL, G.B.S.; CHOUDHURY, B.U. Crop water productivity of cotton–wheat system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, p.137-146, 2006.
- JENSEN, M.E. Impacts of irrigation and drainage on the environment. In: 5th N.D. Gulhati Lecture, The Hague, The Netherlands, French and English, 26 p., 1993.
- JENSEN, M.E. Beyond irrigation efficiency. **Irrigation Science**, v.25, n.4, p.233-245, 2007.
- KIJNE, J.W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Eds.). Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. Wallingford, UK: CABI; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). **Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**, Series 1, 332p. 2003.
- KNOX, J.W.; KAY, M.G.; WEATHERHEAD, E.K. Water regulation, crop production, and agricultural water management-understanding farmer perspectives on irrigation efficiency. **Agricultural Water Management**, v.108, p.3-8, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.007>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- KOECH, R.; LANGAT, P. Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. **Water**, v.10, 1771p., 2018. DOI 10.3390/w10121771.
- LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v.146, p.84-94, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MALANO, H.M.; DAVIDSON, B. A framework for assessing the trade-offs between economic and environmental uses of water in a river basin. **Irrigation and Drainage**, v.58, n.S1, p.S133–S147, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ird.484>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MANCOSU, N.; SNYDER, R.L.; KYRIAKAKIS, G.; SPANO, D. Water scarcity and future challenges for food production. **Water**, v.7, p.975-992, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w7030975>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MBAVA, N.; MUTEMA, M.; ZENGENI, R.; SHIMELIS, H.; CHAPLOT, V. Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v.228, 105878p., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105878>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MCNEILL, K.; MACDONALD, K; SINGH, A.; BINNS, A.D. Food and water security: Analysis of integrated modeling platforms. **Agricultural Water Management**, v.194, p.100 - 112, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.001>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- MESA-JURADO, M.A.; BERBEL, J.; ORGAZ, F. Estimating marginal value of water for irrigated olive grove with the production function method. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.8, n.S2, p.S197-S206, 2010.
- MOLDEN, D.; MURRAY-RUST, H.; SAKTHIVADIVEL, R.; MAKIN, I. A water-productivity framework for understanding and action. In: KIJNE, J.W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Ed.). **Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement**. Wallingford: IWMI and CABI Publishing. 332p., 2003.
- MOLDEN, D. Accounting for Water Use and Productivity. **SWIM Paper**, IIMI, Colombo, n.1, 1997.

- PANG, A.; SUN, T.; YANG, Z. A framework for determining recommended environmental flows for balancing agricultural and ecosystem water demand. **Hydrological Sciences Journal**, v.59, n.3-4, p.890–903, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.816425>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PASSIOURA, J. Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. **Agricultural Water Management**, v.80, p.176–196, 2006.
- PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v.108, p.39–51, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PERRY, C. Accounting for water use: terminology and implications for saving water and increasing production. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1840–1846, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.002>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R.G.; BURT, C.M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1517–1524, 2009.
- ROCKSTRÖM, J.; WILLIAMS, J.; DAILY, G.; NOBLE, A.; MATTHEWS, N.; GORDON, L.; WETTERSTRAND, H.; DECLERCK, F.; SHAH, M.; STEDUTO, P.; DE FRAITURE, C.; HATIBU, N.; UNVER, O.; BIRD, J.; SIBANDA, L.; SMITH, J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. **Ambio**, v.46, n.1, p.4–17, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- RODRIGUES, G.C.; PEREIRA, L.S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. **Biosystems Engineering**, v.103, n.4, p.536–551, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.002>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- SIEBERT, S.; DÖLL, P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. **Journal of Hydrology**, v.384, n.3-4, p.198–217, 2010.
- SINCIK, M.; CANDOGAN, B.N.; DEMIRTAS, C.; BUYUCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GOKSOY, A.T. Deficit irrigation of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in a sub-humid climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.194, p.200–205, 2008.
- SISTO, N.P. Environmental flows for rivers and economic compensation for irrigators. **Journal of Environmental Management**, v.90, n.2, p.1236–1240, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.06.005>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- SMAKHTIN, V.U.; SHILPAKAR, R.L.; HUGHES, D.A. Hydrology-based assessment of environmental flows: an example from Nepal. **Hydrological Science Journal**, v.51, n.2, p.207–222, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.51.2.207>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- SOLOMON, K.H.; BURT, C.M. Irrigation Sagacity: a measure of prudent water use. **Irrigation Science**, v.18, n.3, p.135–140, 1999.
- VALIPOUR, M.; AHMADI, M.Z.; RAEINI-SARJAZ, M.; SEFIDKOUHI, M.A.G.; SHAHNAZARI, A.; FAZLOLA, R.; DARZI-NAFTCHALI, A. Agricultural water management in the world during past half century. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.61, n.5, p.657–678, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.944903>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- VAZIFEDOUST, M.; VAN DAM, J.C.; FEDDES, R.A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigated crop under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v.95, n.2, p.89–102, 2008.
- VIETS, F.G. Fertilizers and the efficient use of water. **Advances in Agronomy**, v.14, p.223–264, 1962.

WALLACE, J.S.; BATCHELOR, C.H. Managing water resources for crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B. Biological Science*, v.352, n.1356, p.937-947, 1997.

XUE, J.; GUI, D.; LEI, J.; SUN, H.; ZENG, F.; FENG, X. A hybrid Bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization. **Advances in Water Resources**, v.110, p.445-458, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.022>. Acesso em: 29 mar. 2021.

YANG, J.; ZHANG, J.; HUANG, Z.; ZHU, Q.; WANG, L. Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. **Crop Science**, v.40, p.1645-1655, 2000.

YANG, J.; ZHANG, J.; LIU, L.; WANG, Z.; ZHU, Q. Carbon remobilization and grain filling in japonica/ indica hybrid Rice subjected to post-anthesis water deficits. **Agronomy Journal**, v.94, p.102-109, 2002.

YANG, J.; ZHANG, J.; WANG, Z.; ZHU, Q.; WANG, W. Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. **Field Crop Research**, v.71, p.47-55, 2001.

YASI, M.; ASHORI, M. Environmental flow contributions from in-basin Rivers and dams for saving Urmia Lake. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, v.41, p.55-64, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-016-0040-1>. Acesso em: 29 mar. 2021.

CAPÍTULO 16

16 EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA

Salassier Bernardo, Elias Fernandes de Sousa e Everardo Chartuni Mantovani

Resumo

Na agricultura irrigada, uma maior eficiência no uso da água possibilitará uma melhor utilização dos demais fatores de produção, resultando em maiores produtividades alinhadas com a preservação ambiental. Tendo em vista que qualquer empreendimento somente será viável se seus benefícios econômicos forem maiores do que os custos, torna-se necessário alcançar a maior eficiência possível de uso da água na agricultura irrigada.

16.1 Introdução

Nas regiões onde se investiu em irrigação, ocorreu desenvolvimento econômico, desenvolvimento social, bem como redução da pobreza local, além dos impactos socioeconômicos diretos, como aumento da produtividade, aumento de lucro do produtor e aumento do número de empregos na região.

A prática da irrigação traz benefícios socioeconômicos indiretos ou externalidades socioeconômicas, mas elas só serão positivas se os projetos tiverem sustentabilidade econômica, sustentabilidade social e sustentabilidade ambiental, ou seja, se forem economicamente viáveis, socialmente responsáveis e ambientalmente saudáveis.

O polo de agricultura irrigada em "Juazeiro-Petrolina" é um dos exemplos vitoriosos no país. Na região, tornou-se evidente a importância da agricultura irrigada para ajudar a minorar a crítica situação social e de desigualdade financeira que vivenciamos. Não podemos esquecer que os investimentos para criar empregos são bem menores na agricultura irrigada do que no comércio e na indústria.

Não obstante os grandes benefícios advindos da irrigação sejam incontestes, ela pode causar alguns impactos ambientais, tais como "consumo exagerado da disponibilidade hídrica da região", "contaminação dos recursos hídricos", "modificação do meio ambiente" e "salinização", entre outros, os quais podem ser minimizados com uma maior eficiência de uso da água na agricultura irrigada.

Pode-se afirmar que a salinização é um subproduto da irrigação mal projetada e mal conduzida. Mas quanto maior for a eficiência de uso da água na irrigação, menor será a lâmina de água aplicada. Como consequência disso, menor será a quantidade de sal trazida para a área irrigada, bem como o volume de água drenado e/ou percolado. Outro efeito colateral da irrigação irracional é a possibilidade de contaminação dos rios, córregos e da água subterrânea, os quais podem também ser minimizados com uma maior eficiência de uso da água.

É de grande importância a conscientização da sociedade sobre a urgência de se usar de forma racional os recursos hídricos. O direito de utilização da água inclui também a responsabilidade de a usar de forma adequada, ou seja, com maior eficiência no seu uso. Sendo assim, é de capital importância "pensar", "ensinar" e "praticar" a irrigação com ênfase na sustentabilidade ambiental.

A demanda crescente por água, pelos vários setores da sociedade, associada aos movimentos de conscientização sobre a importância da água e de um meio ambiente menos poluído, sem dúvida aumentará a pressão para que a agricultura irrigada seja conduzida com maior eficiência de uso da água.

Neste sentido, desenvolveu-se funções de produção objetivando: "otimização física", "otimização econômica", "ponto de equilíbrio", "eficiência de uso da água" e "rendimento por unidade de lâmina aplicada". Explicitaram-se, como demonstração, exemplos de aplicações dessas funções com dados reais.

Para o manejo racional de qualquer projeto de irrigação, alguns aspectos estão inter-relacionados e devem ser considerados. Os aspectos sociais e ecológicos regionais devem ser levados em conta na busca da maximização da produtividade e da eficiência de uso de água. A redução de custos, quer de mão de obra quer de capital, não pode prescindir das adequadas condições de umidade do solo e fitossanitárias para o bom desenvolvimento da cultura. Por outro lado, é possível aumentar a rentabilidade do cultivo devido ao aumento da produtividade ou a incorporação de terras que, sem o uso da irrigação, seriam economicamente inviáveis. E tendo sempre em mente a necessidade de melhorar ou, no mínimo, manter as condições físicas, químicas e biológicas do solo.

Tem-se que considerar, no manejo da irrigação, parâmetros que dependem do tipo de sistema de irrigação e do próprio projeto em si, como: grau de automação; reúso da água que escoar no final da parcela; necessidade de sistematização; medição de vazão; custo e disponibilidade de água e de mão de obra; características da cultura irrigada; e outros. Devem ser abordados juntamente com aqueles parâmetros comuns a todos os sistemas de irrigação, ou seja, quando irrigar; quanto aplicar por irrigação; a uniformidade de aplicação; a eficiência de uso da água; o benefício da irrigação; entre outros.

É importante que, na elaboração e na condução de um projeto de irrigação, não sejam consideradas apenas a captação e a condução de água ou somente a sua aplicação dentro da parcela, mas que se faça a abordagem como uma operação integrada. Deve-se considerar também a equidade na distribuição da água, as práticas culturais, a retirada do excesso de água da área irrigada e a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Caso essa integração não seja considerada, quer por falta de conhecimento, quer por falta de planejamento, a eficiência do projeto e sua vida útil serão muito prejudicadas.

Infelizmente, é muito comum, no desenvolvimento dos projetos públicos de irrigação, tratar isoladamente as seguintes etapas: "estudo de viabilidade", "planejamento", "dimensionamento" e "construção". E, para complicar ainda mais, não consideram os aspectos relacionados à operação e manutenção dos projetos depois de concluídos. Não se pode esquecer de que um sistema de irrigação é um processo dinâmico e de que essas etapas não podem ser tratadas isoladamente, mas como um todo, juntamente com os aspectos de agroengenharia, os sociais e os de impacto ambiental.

Na agricultura irrigada, o fator água otimizado possibilitará, sem maiores riscos, melhorar a utilização dos demais fatores de produção. Por consequência, uma maior produtividade será obtida com uma melhor combinação dos insumos empregados, sempre partindo do fato de que água é um bem nobre, com disponibilidade cada vez mais limitada e de uso múltiplo.

Atualmente, no mundo globalizado, há escassez de água de boa qualidade e de energia juntamente com uma crescente demanda de alimentos. Esse fato acarreta

aumento dos custos da produção agrícola, pois congrega o aumento da demanda com a redução de oferta de insumos. Não se pode esquecer que qualquer empreendimento somente será economicamente viável se seus benefícios econômicos forem maiores do que os custos. Por isso, tem-se que, com urgência, melhorar a eficiência de uso da água na agricultura irrigada.

Os projetos públicos de irrigação na região nordeste brasileira foram as bases para a implantação dos atuais projetos privados e, como consequência, fundamentais para a geração de empregos diretos e indiretos. Foi a ação governamental de menor custo e mais efetiva para a inclusão social na região, ajudando a reduzir a pobreza e a migração para a periferia das grandes cidades.

Têm-se à disposição bons conhecimentos técnicos para “dimensionar” e boas práticas para “implantar” sistemas de irrigação. Estas atividades podem ser consideradas as partes mais fáceis do projeto. Em projetos públicos, sem a menor dúvida, as mais difíceis de serem realizadas são: a seleção e a locação de colonos nos assentamentos; a seleção de produtores empreendedores para os projetos maiores (de modo a evitar os aventureiros) e o estabelecimento da corrente de comercialização de modo a dar viabilidade e sustentabilidade aos projetos de irrigação.

16.2 Meio ambiente

Existem muitas evidências no mundo de que, após os benefícios iniciais da irrigação, grandes áreas têm-se tornado impróprias à agricultura. Devido à condução inadequada da irrigação, tem-se produzido impactos ambientais adversos ao solo, à disponibilidade e à qualidade da água, à fauna, à flora e, em alguns casos, às condições socioeconômicas da população local.

Em geral, os grandes projetos de irrigação incluem barragens, lagos, unidades de bombeamento, canais e tubulações, sistema de distribuição d'água nas parcelas e sistema de drenagem. Assim, para analisar os efeitos da irrigação sobre o meio ambiente, devem ser considerados os diversos tipos de impactos ambientais inerentes aos projetos de irrigação, ou seja, impactos ambientais nas áreas inundadas, impactos ambientais à jusante das barragens e impactos ambientais da irrigação propriamente dita.

Quanto aos aspectos ecológicos, não são benéficas ao desenvolvimento sustentado da irrigação as posturas de desconsideração ou de supervalorização do impacto ambiental advindo da irrigação. Deve-se envidar esforços no sentido de obter dados confiáveis que permitam quantificar, com precisão, a magnitude do impacto ambiental ocasionado pela irrigação, de modo a serem considerados na implementação e no manejo dos projetos. Tal procedimento possibilitará um crescimento sustentável da irrigação no Brasil, evitando assim um crescimento baseado exclusivamente em benefícios financeiros de curto prazo, sem considerar os problemas relacionados ao meio ambiente.

A modificação do meio ambiente está historicamente mais associada ao aproveitamento das várzeas alagadas para o uso de sistemas de irrigação por superfície, notadamente por inundação ou sulco. A drenagem de grandes áreas contínuas e seu cultivo intensivo tem causado distúrbios às condições naturais da área, eliminando a vegetação nativa e, como consequência imediata, alterando a microflora e fauna regional, a produção de peixes, a população de insetos e as condições de erosão e sedimentação na bacia hidrográfica. Isso não impede o aproveitamento das várzeas de maneira racional, deixando um percentual da área em condições naturais a fim de manter o ecossistema que servirá de refúgio e local de reprodução da fauna.

Sem dúvida, um dos principais instrumentos para mitigação do impacto ambiental provocado pela irrigação será uma política intensiva de melhoria no manejo da irrigação. Política esta que exige mais estudos, mais pesquisas e mais ações extensionistas sobre o manejo da irrigação, passíveis tanto de premiação quanto de fiscalização. O Governo não pode prescindir de ações fiscalizadoras e até repressivas, quando necessárias, pois água de boa qualidade torna-se, cada dia mais, um bem muito escasso.

Não se pode concordar com aqueles que preconizam a paralisação do desenvolvimento de novos projetos de irrigação por causa de possíveis problemas ecológicos. Por outro lado, não se pode alinhar com os que desconsideram totalmente os impactos ambientais relacionados com os novos projetos e se apoiam somente na relação custo/benefício. Ambos analisam, exclusivamente, uma única face do problema. Acredita-se que, na maioria dos casos, é possível compatibilizar desenvolvimento agrário com proteção ambiental.

As fases de planejamento e dimensionamento do projeto são os momentos adequados para diagnosticar os possíveis impactos ambientais resultantes da irrigação. Nelas podem ser realizados os ajustes necessários, de modo que os possíveis efeitos adversos oriundos da implementação do projeto sejam minimizados.

Os principais tipos de impactos ambientais inerente à irrigação são: o consumo exagerado da disponibilidade hídrica da região, a contaminação dos recursos hídricos (rios e águas subterrâneas), a modificação do meio ambiente e o consumo elevado de energia.

Órgãos internacionais já preconizam a necessidade de uma redução em torno de 10% do consumo mundial de água na agricultura. No planeta, a irrigação utiliza aproximadamente 68% do total de água retirada dos mananciais. No Brasil, com a irrigação, a utilização está em torno de 46,2% do total de água derivada dos nossos mananciais. Em outras atividades, são utilizados em torno de 23,3% para o abastecimento urbano; 9,2% para a indústria; 7,9% para a pecuária; 1,6% para a mineração, 10,3% para as termelétricas, e 1,6% para o abastecimento rural (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2017). Deste modo, cada vez mais, torna-se imprescindível a conscientização da sociedade sobre a necessidade de se usar de forma racional os recursos hídricos. O direito de utilização da água exige como contrapartida a responsabilidade de usá-la de forma mais eficiente.

O Brasil dispõe de aproximadamente 14% da água doce do planeta. Porém, em torno de 80% dessa água encontra-se na região Norte, onde vivem aproximadamente 7% da população. Nas regiões Sudeste e Sul, onde se concentram aproximadamente 60% da população e a maioria da atividade econômica do país, tem-se apenas 13% dessa água.

16.3 Benefício da irrigação

Um bom programa de irrigação pode beneficiar uma cultura de muitos modos, a saber: aumenta sua produtividade; permite maior eficiência no uso de fertilizantes; permite uma programação de cultivo, isto é, a elaboração de uma escala de plantio que possibilite a obtenção de duas ou mais colheitas por área/ano; introduz culturas com maior valor de mercado; otimização dos ativos da fazenda, o que minimiza os riscos do investimento na agricultura. Além disso, aumenta a demanda de mão de obra na agricultura que, por sua vez, fixa o homem ao meio rural, minimizando o êxodo rural desordenado que potencializa o crescimento populacional nas periferias das cidades. Mas é de capital importância que se tenha consciência de que a irrigação como prática

isolada não propiciará os benefícios desejados. É necessário estar associada a outras práticas culturais para poder gerar os lucros esperados da agricultura irrigada, tais como, variedades produtivas e de bom valor comercial, adubações e tratamentos culturais apropriados.

Nas regiões onde se investiu em irrigação, ocorreu desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e, conseqüentemente, redução de pobreza. Notadamente quando as ações foram integradas, sequenciais e em tempo hábil, permitindo a consolidação da corrente produtiva e a sustentabilidade de mercado para os produtos.

Além dos impactos socioeconômicos diretos da agricultura irrigada, como o aumento da produtividade e da produção e, conseqüentemente, do lucro do produtor e do aumento do número de empregos na região, existem benefícios socioeconômicos indiretos ou "externalidades socioeconômicas". Mas as externalidades socioeconômicas somente serão positivas se os projetos de irrigação tiverem sustentabilidade econômica, social e ambiental. Ou seja, a agricultura irrigada deve ser economicamente viável, socialmente responsável e ambientalmente saudável.

Os resultados relacionados aos indicadores de externalidades socioeconômicas não aparecem imediatamente após a implantação dos projetos de irrigação. Geralmente demandam um tempo de maturação em torno de dez anos. Isso se deve a vários fatores, como: a incapacidade do "entorno" de vislumbrar oportunidades; a necessidade de capital e de mão de obra qualificada; a introdução de culturas e de sistemas de produção novos na região; a abertura de novos mercados para comercialização da produção.

Sem dúvida, o polo de agricultura irrigada em "Juazeiro - Petrolina" é um dos exemplos vitoriosos no país. Houve, no início, os projetos públicos, seguidos de parcerias com o setor privado, gerando crescimento rápido com base em projetos privados, com real sucesso socioeconômico. Assim posto, é evidente a grande importância da agricultura irrigada para ajudar a minorar a crítica situação social e de desigualdade financeira do país. Destaca-se que os investimentos necessários para criar empregos são bem menores na agricultura irrigada do que no comércio e na indústria, principalmente na indústria química.

16.4 Salinização do solo

A maioria das grandes áreas irrigadas no mundo sofre, em maior ou menor intensidade, os efeitos da salinização do solo. Muitas áreas que já foram grandes produtoras de alimentos tornaram-se terras salinizadas e improdutivas. A salinização do solo afeta a germinação, a densidade e o desenvolvimento vegetativo das culturas, reduzindo suas produtividades e, nos casos mais intensos, levam as plantas à morte.

Estimativa da FAO adverte que aproximadamente 50% dos 250 milhões de hectares irrigados no mundo já apresentam problemas de salinização e saturação do solo e que 10 milhões de hectares são abandonados anualmente em virtude desses problemas.

As principais causas da salinização nas áreas irrigadas são os sais provenientes da água de irrigação e/ou, do lençol freático, quando este se eleva até próximo à superfície do solo. Pode-se afirmar que a salinização é subproduto da irrigação; por exemplo, cada lâmina de 100 mm de água de irrigação, com concentração de sais de $0,5 \text{ g L}^{-1}$, conduz 500 kg ha^{-1} de sal à área a ser irrigada. Por isso, há necessidade do manejo adequado da água, pois, quanto maior for a eficiência de uso da água na irrigação, menor será a lâmina de água aplicada. Por conseqüência, menor será a

quantidade de sal conduzida para a área irrigada, bem como o volume de água drenado e/ou percolado.

Com as irrigações sucessivas, o sal vai-se acumulando quando não é removido por drenagem e/ou lixiviação. Na ausência de drenagem e/ou lixiviação, o sal se acumula na superfície do solo devido ao fluxo ascendente de umidade decorrente da evapotranspiração, criando os chamados solos salinos.

16.5 Contaminação dos recursos hídricos

Outra séria consequência da irrigação mal conduzida é a contaminação de rios, dos córregos e da água subterrânea. O excesso de água aplicada à área irrigada, que não é evapotranspirada pelas culturas, retorna aos rios e córregos por meio do escoamento tanto superficial quanto subsuperficial ou vai para os depósitos subterrâneos por percolação profunda. Nesta dinâmica, a água pode arrastar consigo sais solúveis, fertilizantes (N, P e nitratos), resíduos de defensivos e herbicidas, elementos tóxicos etc. Sem dúvida, a contaminação dos recursos hídricos tem causado sérios problemas ao suprimento de água potável, tanto nos centros urbanos como no meio rural.

A contaminação de rios e córregos é mais rápida e acontece imediatamente após a aplicação da água na irrigação por superfície, ou seja, por sulco, faixa e inundação. Na região sul do Brasil, têm-se verificado sérios problemas devido à aplicação de herbicidas na irrigação por inundação do arroz, uma vez que parte da vazão aplicada sempre circula pelos tabuleiros e retorna aos córregos. É inerente ao método de irrigação por sulco, amplamente utilizada no passado, o escoamento, no seu final, de parte da vazão aplicada no início do sulco. Essa vazão que escoar no final dos sulcos traz sedimentos (em virtude da erosão no início do sulco), fertilizantes, defensivos e herbicidas. No final da parcela, ela é coletada pelo dreno que a conduz aos córregos.

A contaminação de rios e córregos também pode ocorrer de um modo um pouco mais lento, por meio do lençol freático subsuperficial que arrasta os elementos citados, exceto os sedimentos. Essa contaminação pode ser agravada se, no perfil do solo irrigado, houver sais solúveis, já que a água que se movimenta no perfil do solo arrasta tanto os sais trazidos para a área irrigada pela água de irrigação como os sais dissolvidos no perfil do solo.

A contaminação da água subterrânea é muito mais lenta. O tempo necessário para a água percolada atingir a água subterrânea aumenta com o decréscimo da permeabilidade do solo e com o aumento da profundidade do lençol freático. Dependendo da permeabilidade do solo, para a água atingir um lençol freático situado a aproximadamente 30 m de profundidade, o tempo necessário pode variar de 20 a 50 anos. Tal fato se torna um problema mais sério, tendo em vista que transcorrerá muito tempo até se ter ciência de que a água subterrânea está contaminada. Na poluição da água subterrânea, os sais dissolvidos, os nitratos, os pesticidas e os metais pesados são as substâncias químicas mais preocupantes.

Quanto maiores forem as perdas por escoamento superficial e por percolação na irrigação, maiores serão as chances de contaminação dos mananciais e da água subterrânea. Assim, torna-se cada vez mais necessário dimensionar e manejar os sistemas de irrigação com maior eficiência de uso da água.

A água que retorna da irrigação pela superfície ou subsuperfície do solo tem que ser considerada componente inerente aos recursos hídricos da bacia hidrográfica. A agricultura irrigada, normalmente, descarrega seu retorno diretamente no sistema hidrológico da bacia. Sendo assim, à medida que a área irrigada aumenta, os conflitos

sobre o uso de água se agravarão, uma vez que a população, cada vez mais, está conscientizando-se sobre a importância da qualidade dos mananciais. Sob este ponto de vista, deve-se, sempre que possível, utilizar métodos de irrigação que permitem, com mais facilidade, uma maior eficiência de uso da água. A agricultura irrigada atual está se desenvolvendo privilegiando o uso de sistemas mais eficientes na aplicação de água como é o caso do pivô central, gotejamento, microaspersão e da nova aspersão convencional.

16.6 Disponibilidade de água

A humanidade já passou por diversas crises, como as de epidemia, alimentos e petróleo. Sem dúvida alguma, as atuais são de energia e disponibilidade de água de boa qualidade.

A crise de disponibilidade de água afetará a irrigação e será afetada por ela. Existem, no Brasil, dois grupos de problemas envolvendo a disputa pelo uso da água: um governamental, compreendendo o uso da água para irrigação, para hidroelétricas e para consumo urbano (humano e industrial); o outro se relaciona ao uso múltiplo da água pelos usuários de um rio.

Em algumas bacias, após a implementação de vários projetos de irrigação sem a adequada quantificação do volume de água disponível, tem faltado água para as áreas situadas a jusante. Esse problema pode ser se agravado, levando à falta de água para o consumo humano, animal e da fauna silvestre, causando, conseqüentemente, sérios impactos ambientais e atritos entre os envolvidos.

No passado a irrigação no Brasil, infelizmente, não era praticada com boa eficiência. Porém, observa-se, analisando os últimos 15 anos, uma mudança substancial no desempenho dos sistemas. Houve notável melhoria nos índices de eficiência do uso da água na agricultura irrigada no País. Pode-se atribuir esta mudança como consequência da pressão da sociedade; da maior conscientização dos produtores; da disponibilidade de sistemas de irrigação mais eficientes; da implementação da nova legislação da água no Brasil (por exemplo a Lei 9433 de 2017); e do alto custo da energia elétrica entre outros. Importante ressaltar a demanda crescente por água, pelos vários setores da sociedade, associada a maior conscientização da população sobre a importância do meio ambiente mais saudável (menos poluído) e fatores econômicos (custo da irrigação). Sem dúvida, tiveram grande impacto para que a irrigação seja conduzida com maior eficiência de uso da água. Ela deverá causar o mínimo de impacto possível no meio ambiente, notadamente no que diz respeito à disponibilidade e qualidade de água para as múltiplas atividades.

Deste modo, torna-se de grande importância a conscientização da sociedade em geral sobre a necessidade de se usar de forma racional os recursos hídricos. O direito de utilização da água inclui também a responsabilidade em a usar de forma adequada. Sendo assim, é de capital importância pensar, ensinar e praticar a irrigação com ênfase na sustentabilidade ambiental.

Dentre as atividades rurais, a irrigação é uma das práticas utilizadas na produção agrícola que mais consome energia. Atualmente ao se fazer análise e avaliação de projetos de irrigação em funcionamento, as modificações sugeridas para melhorar a eficiência da irrigação, ou seja, para otimizar o uso da água têm como consequência direta a redução do consumo de energia.

É comum verificar que os benefícios econômicos de uma melhoria no manejo da irrigação estão mais relacionados com a redução do custo com energia do que com o

possível aumento da produtividade, notadamente nas culturas com menor valor de mercado.

Considerando ainda que as principais fontes de energia são as hidroelétricas e os derivados do petróleo, ambas as fontes produzem significativos impactos ambientais. O consumo de energia torna-se cada vez mais limitante, demandando prioridades no aumento da eficiência da irrigação. Importante também citar o uso crescente de fontes de energia sustentáveis como a energia eólica, fotovoltaica e de biomassa, que trazem uma nova perspectiva tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

Embora os grandes benefícios advindos do uso da irrigação sejam incontestáveis, os projetos de irrigação podem causar impactos adversos ao meio ambiente, à qualidade do solo e da água e ao aspecto socioeconômico da região. Assim, os sistemas de irrigação mal dimensionados, mal implementados e mal manejados ou incompletos, como os sem drenagem adequada, provocaram graves impactos ambientais no passado.

A falta de uma abordagem adequada desses impactos não contribui para o desenvolvimento sustentado da irrigação. Há os que advogam que se deve deixar a terra como ela era originalmente. Para isso, é necessário que a população renuncie ao padrão de conforto, alimentação e energia que usufrui atualmente, o que não será nada fácil. Também não é ético que pessoas que vivem confortável e prosperamente, em virtude de riquezas advindas de projetos já implementados, critiquem ou impeçam o desenvolvimento de novos projetos. Do mesmo modo, não se pode concordar com aqueles que preconizam a obtenção de alta produtividade visando exclusivamente ao lucro financeiro, desconsiderando suas possíveis consequências.

Assim sendo, cada vez mais, os técnicos que tratam desse assunto deverão cuidar para que a irrigação no país seja implementada de forma adequada, e que seus benefícios não sejam ilusórios ou momentâneos - sempre com enfoque no desenvolvimento sustentado, de modo a gerar benefícios a curto, médio e longos prazos, sem degradar o solo e o meio ambiente. Nessa ótica, é necessário trabalhar para conscientizar a população de que água e energia são bens preciosos, com disponibilidade cada vez mais limitada e de uso múltiplo.

Como a disponibilidade de água de boa qualidade tem sido reconhecida como vital para as futuras gerações e a irrigação tem provocado alterações no meio ambiente difíceis de prever, é fundamental que se estabeleçam padrões claros e concisos para a avaliação do impacto ambiental resultante da irrigação. Isso permitirá o crescimento da irrigação sem a repetição dos problemas e malefícios constatados em alguns projetos em funcionamento ou desativados.

É possível conciliar direta e indiretamente a expansão da irrigação no Brasil com a proteção do meio ambiente. Pode-se afirmar que o uso racional e o crescimento bem planejado da irrigação, sem prejuízo para o meio ambiente, são viáveis. Ou seja, tem-se que pensar, ensinar e praticar a irrigação com ênfase na sustentabilidade ambiental.

16.7 Manejo de irrigação e o sistema solo-planta-atmosfera

Qualquer planejamento ou qualquer operação de um projeto de irrigação que vise à máxima produção e à boa qualidade do produto, usando de maneira eficiente a água, requer conhecimento das inter-relações entre o sistema solo-água-planta-atmosfera e manejo de irrigação.

Em regiões áridas, onde a água é fator limitante, as pesquisas devem ser conduzidas de modo que se faça o planejamento de irrigações em termos de máxima produção por unidade de água aplicada. Noutras condições, pode ser preferível orientar

as pesquisas para a obtenção de máxima produção por unidade de área cultivada, por unidade de custo de mão de obra, por unidade de consumo de energia, ou para aumentar o emprego de mão de obra no meio rural, visando ao assentamento de famílias marginalizadas, ou ainda para assegurar a estabilidade social na região.

Ao iniciar um projeto de irrigação, deve-se ter em mente alguns propósitos, por exemplo, aumentar a produção, economizar trabalho, maximizar a eficiência de uso da água e minimizar a deterioração da estrutura do solo e a perda de nutrientes.

Há alguns princípios básicos que são úteis ao planejamento e à operação de um projeto de irrigação: (i) Para que haja o máximo crescimento vegetativo, a transpiração de uma superfície vegetal deve ser mantida na sua capacidade potencial, nas condições climáticas prevaletentes, (ii) Durante o ciclo de irrigação, a tensão máxima da água do solo que se deve permitir é aquela na qual ainda haverá suficiente absorção de água pela planta, de modo que a ocorrência de deficiência hídrica não tenha impacto significativo na produtividade da cultura, (iii) A razão entre a água evapotranspirada pela cultura e a aplicada pela irrigação deve aproximar-se de um, para que se tenha máxima eficiência de uso e de aplicação, e (iv) Geralmente, a seleção de culturas ou de práticas culturais que visem ao aumento da produtividade ou à diminuição do ciclo vegetativo aumentará a eficiência de uso de água.

Em cada situação, as respostas para as mais importantes questões sobre irrigação, como "Quando irrigar?", "Quanto de água aplicar?", "Como aplicar a água?", devem ser baseadas nos princípios já mencionados e em pesquisas locais, e não em práticas específicas que tiveram sucesso em outras regiões.

Questões como "Qual percentagem de água útil pode ser utilizada?", "Qual tensão pode ser permitida na zona radicular de uma cultura sem reduzir a sua produtividade?" não têm a mesma resposta em todas as regiões. Esses limites devem ser determinados para cada situação ou extrapolados de outras regiões que tenham as mesmas condições edafoclimáticas. Em outras palavras, não há práticas específicas que possam ser generalizadas universalmente.

O *deficit* de água pode causar decréscimo acentuado nas atividades fisiológicas, principalmente na divisão e no crescimento das células e, em consequência, no crescimento das plantas. Quando o *deficit* ocorre em períodos curtos, normalmente após as 13 horas, quando há maior demanda evapotranspirométrica, seu efeito é mínimo, mas, quando persiste por longos períodos, seu efeito é drástico.

Em geral, as plantas cultivadas são mais sensíveis ao *deficit* de água no período que vai do início da formação floral até a fase inicial de enchimento de grãos.

A capacidade de retenção de água na zona radicular depende, basicamente, da textura e da estrutura do solo, da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e da profundidade da camada de solo. Quanto maior a profundidade do sistema radicular, maior a capacidade de retenção de água no solo; contudo, quanto mais profunda a camada do solo, menor será a percentagem de água aproveitável nessas camadas. Isso se deve ao decréscimo da densidade de raízes com o aumento da profundidade e a necessidade de maior gradiente de potencial para retirar água das camadas mais profundas. Isso pode ser visto na Figura 1, determinada por Gardner (1965), em que se observa o perfil da absorção de água pelas raízes de sorgo, em função da profundidade do solo e do número de dias após a irrigação.

Para obter máxima produtividade, o turno de rega deve, portanto, ser realizado de forma que a planta não precise extrair água das camadas mais profundas.

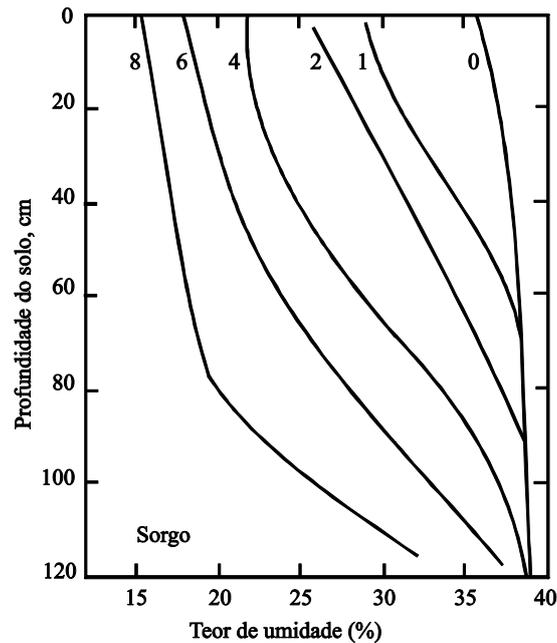


Figura 1. Perfil de extração de água pelas raízes de sorgo em função da profundidade do solo e do número de dias após a irrigação (GARDNER, 1965).

16.8 Relação entre produtividade e disponibilidade de água

Na literatura, há vários tipos de funções que relacionam produtividade com disponibilidade de água. Entre essas funções, é comum encontrar uma correlação entre produtividade e evapotranspiração, conforme ilustrado por Alves *et al.* (1982) na Figura 2.

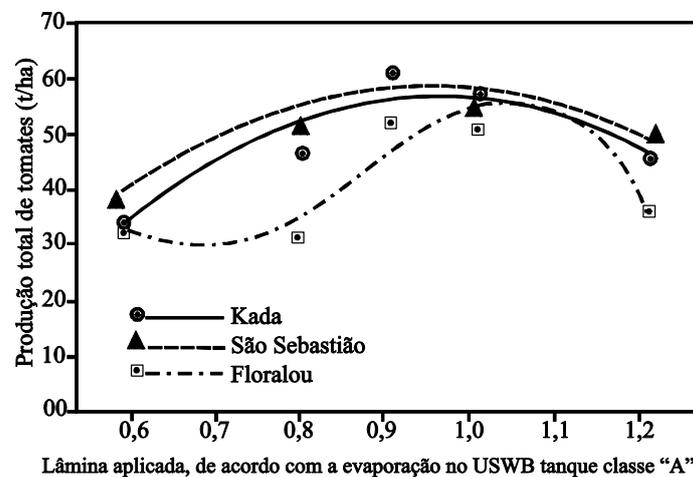


Figura 2. Curvas da produção total de tomate dos cultivares Kada, São Sebastião e Floralou (ALVES *et al.*, 1982).

O suprimento total de água (STA) nas áreas irrigadas é constituído pela sua disponibilidade no solo na época do plantio (DAP), pela precipitação efetiva durante o ciclo da cultura (PE) e pela irrigação aplicada (IR). Com base nos trabalhos de Stewart *et al.* (1976), pode-se facilmente relacionar a produtividade com os fatores que compõem o suprimento total de água, conforme ilustrado na Figura 3.

Analisando a Figura 3, verifica-se que, em agricultura não irrigada (agricultura de sequeiro), tem-se determinada produtividade, a qual dependerá da disponibilidade de água no solo na época do plantio (DAP) e da precipitação efetiva durante o ciclo da

cultura (PE). Na agricultura irrigada, se a eficiência de uso de água fosse de 100%, toda a água aplicada por irrigação seria consumida pela evapotranspiração, desse modo, ter-se-ia uma função linear entre lâmina de irrigação e produtividade. Entretanto, como na realidade não se tem irrigação com eficiência de 100%, parte da água aplicada não será convertida em produtividade, ou seja, não será consumida pela evapotranspiração. Quanto maior a quantidade de irrigação a fim de se obter máxima produtividade, menor será a eficiência de uso de água; por conseguinte, a função de produtividade *versus* irrigação será convexa. Se a aplicação de água for em excesso, poderá haver decréscimo da produtividade, conforme ilustrado.

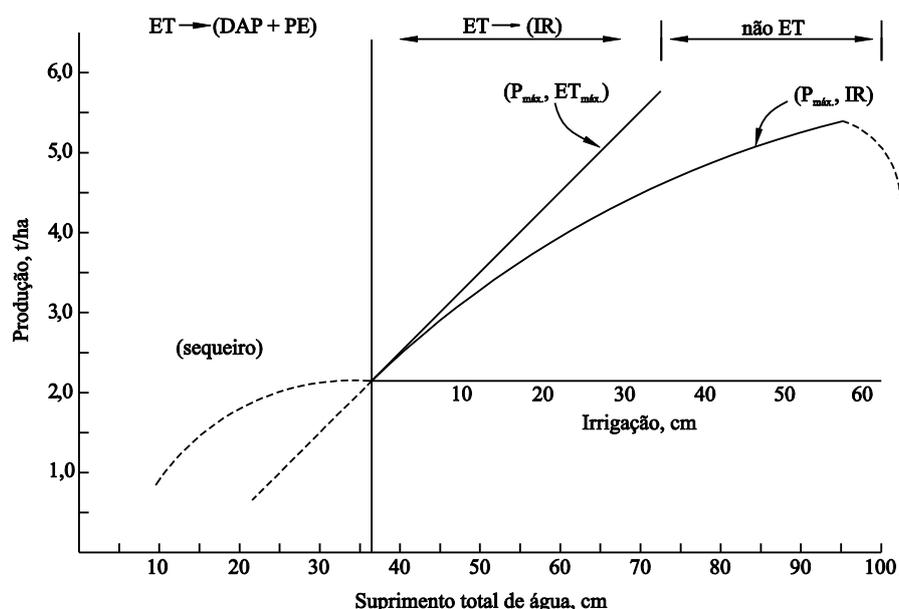


Figura 3. Relação entre produtividade, disponibilidade de água no solo na época do plantio (DAP), precipitação efetiva (PE), irrigação (IR) e evapotranspiração (ET).

16.9 Maximização da produtividade por unidade de água aplicada

Pode-se conseguir este objetivo da seguinte maneira: (i) Adequando melhor a irrigação aos períodos críticos de *deficit* de água: Para isso, precisam ser conhecidas as fases críticas das diversas culturas nas diferentes regiões do país e somente suprir adequadamente de água através da irrigação nesses períodos. Fora desses períodos, deve-se realizar suprimento parcial de água somente por meio da irrigação e/ou trabalhar com maior probabilidade de chuva. Já são bastante conhecidos os seguintes períodos críticos de *deficit* de água, comuns à maioria das culturas: germinação, floração e enchimento de grãos, e (ii) Irrigando com *deficit* de água em relação à evapotranspiração real: Consiste em estabelecer um programa de irrigação em que a lâmina média aplicada seja sempre menor do que a lâmina média evapotranspirada. Esse manejo é mais eficiente em sistemas de irrigação que facilitam a aplicação mais frequente (menor turno de rega) e com menor lâmina, como é o caso de irrigação por gotejamento, microaspersão, auto propelido e pivô central. Nesses dois últimos sistemas haveria a preocupação somente de manter elevado o teor de umidade nos primeiros 30 cm do solo, onde a demanda de umidade é maior, de acordo com a Figura 1. Para isso, podem-se usar tensiômetros instalados até 30 cm de profundidade, para funcionarem como indicadores de quando irrigar, uma vez que se sabe que os tensiômetros só funcionam na faixa superior de umidade do solo, ou seja, até uma tensão de aproximadamente 70 cbar.

Para as condições brasileiras, em que as irrigações, em razão da ocorrência de chuvas no principal período de cultivo, “devem ser suplementares”, esse manejo, principalmente no período das chuvas, é o recomendável. Ele requer sistemas com menor capacidade, tanto da moto bomba como das tubulações, portanto com menor custo inicial e de operação. Ele aplica menor lâmina total de irrigação durante o ciclo da cultura, causando menor decréscimo de produtividade, em relação à produtividade potencial, o que permite melhor aproveitamento das chuvas.

Na fase inicial da cultura, como o consumo de água é menor que a evapotranspiração de referência (ET_o), pode-se aplicar, por meio da irrigação, um pouco menos do que a evapotranspiração da cultura (ET_c). Com isso, manter-se-á todo o perfil do solo com elevado teor de umidade. No período de máxima demanda evapotranspirométrica, manter-se-á o turno de rega pequeno e far-se-ão aplicações de quantidade um pouco menor que a ET_c; com isso, haverá reposição de umidade somente na camada superior do solo e a planta retirará parte da água necessária das camadas mais profundas. Na época de enchimento dos grãos, deve-se aplicar a lâmina necessária para atender à evapotranspiração real nessa fase.

16.10 Maximização da produtividade por unidade de área

Este objetivo pode ser economicamente justificado quando se tem limitação de áreas agricultáveis e/ou não se tem limitação de água e o custo de operação do sistema de irrigação é relativamente baixo.

Para conseguir máxima produção por unidade de área (produtividade), é necessário dispor de um suprimento de água suficiente para atender à demanda diária de evapotranspiração potencial. Será necessário um sistema capaz de irrigar a área com alta frequência de modo que seja mantido em nível elevado o teor de umidade da camada de solo na zona radicular. Para que as taxas de evapotranspiração e de fotossíntese sejam processadas e mantidas nos seus valores potenciais, deve-se manter elevada a disponibilidade de água no solo. Em muitas culturas, para que se obtenha máxima produtividade, em geral, deve-se permitir que somente sejam usados, entre duas irrigações sucessivas, 25 a 40% da disponibilidade de água do solo. É bom lembrar que nem sempre se deseja a produção da planta como um todo, mas somente de determinada parte da planta, por exemplo, grãos, raízes, entre outras, e que nem sempre a maior produtividade desta parte e/ou sua melhor qualidade estão relacionadas com o maior crescimento.

A maior ou menor frequência de irrigação dependerá muito do método de irrigar. É muito difícil, e não faz muito sentido, usar um turno de rega longo na irrigação por gotejamento ou por microaspersão, bem como um turno de rega muito curto na irrigação por superfície.

Em geral, para obter boa produtividade, podem-se usar, entre duas irrigações sucessivas, os seguintes percentuais de disponibilidade de água do solo: (i) verduras e legumes 20 a 60%, (ii) frutas 30 a 70%, (iii) feijão, milho e soja 40 a 70%, e (iv) sorgo, trigo e algodão 50 a 80%.

Quando se está praticando irrigação com alta frequência (gotejamento, microaspersão, pivô central) e suprindo a demanda evapotranspirométrica, não há necessidade de se preocupar com o nível de disponibilidade de água no solo, pois, nesses casos, essa disponibilidade será sempre elevada.

16.11 Maximização dos lucros

Não se deve irrigar pelo simples prazer de dizer que está praticando agricultura irrigada. Com racionalidade e responsabilidade ambiental, o objetivo deve ser aumentar o lucro, obtendo maior produtividade, seja em quantidade, seja em qualidade. Além disso, pode-se buscar incorporar à agricultura terrenos em que, sem o uso da irrigação, não seria possível cultivar.

A estimativa do lucro é obtida por meio da comparação da estimativa do valor econômico da produção com a estimativa do custo financeiro a ser aplicado. Para isso, é necessário que se conheça o custo da irrigação por unidade de energia consumida, por unidade de volume de água aplicado e por número de irrigações, bem como a função de produtividade *versus* irrigação e o valor da produção.

Para estimar a demanda e o custo da energia, usa-se a seguinte equação:

$$DE = 0,0271 \frac{A D Hm}{Ei Emb} \quad (1)$$

em que DE se refere à demanda de energia (kWh), A à área a ser irrigada (ha), D à lâmina aplicada por irrigação ou no ciclo (mm), Hm à altura manométrica (m), Ei à eficiência de irrigação, em decimal; e Emb à eficiência da moto bomba, em decimal.

16.12 Otimização da eficiência de uso da água na agricultura

A sustentabilidade no uso dos recursos hídricos e de energia é a base para o aumento consolidado da produtividade agrícola e para a maior oferta permanente de empregos no meio rural. Para tanto, urge um choque de gestão e de regulamentação na prática do manejo da irrigação, envolvendo forte parceria público-privada. Mais do que nunca, precisa-se de uma gestão inovadora, a fim de melhorar o manejo e a eficiência da irrigação. Não será possível desconsiderar os efeitos relacionados aos impactos ambientais e ao consumo de água, daí a importância do enfoque de sustentabilidade. Se necessário, deve-se definir e impor limites mínimos de eficiência do uso da água para as diferentes regiões no país.

Na agricultura irrigada, o fator água deve ter seu uso otimizado, possibilitando, sem maiores riscos, o maior aproveitamento dos demais fatores de produção. Por consequência, é possível obter maior produtividade com uma melhor combinação dos insumos empregados. Para tanto, o conhecimento das funções de produtividade ou superfícies de resposta torna-se ferramenta importante para auxiliar nas decisões no processo de produção agrícola. Essas funções possibilitam determinar as interações entre os diversos fatores que afetam a produtividade, o que permite escolher as soluções mais condizentes com a realidade regional, como aquelas que produzirão maior eficiência de uso da água.

Na agricultura irrigada, a análise econômica dos projetos é importante quando o custo dos processos de captação, condução e aplicação da água é elevado. Há cenários em que, em função das elevadas diferenças de nível e/ou longas distâncias entre a captação e a área irrigada, em função da utilização de emissores que demandam elevadas pressões de serviço - o que afeta expressivamente o custo da energia -, em função do uso de sistemas de irrigação de alto valor, há significativa elevação do custo de implantação dos projetos por unidade de área. Em contrapartida, as análises de eficiência de uso de água (produtividade por unidade de lâmina aplicada) devem receber especial atenção onde há pouca disponibilidade de água para irrigação. Maior cuidado é necessário em regiões onde já existem conflitos decorrentes dos usos múltiplos da

água, de modo a reduzir o impacto no meio ambiente, notadamente no que diz respeito à disponibilidade e à qualidade de água para as múltiplas atividades.

A finalidade básica da irrigação é proporcionar água às culturas para atender às exigências hídricas durante todo seu cultivo, possibilitando altas produtividades e produtos de boa qualidade. A quantidade de água necessária às culturas está relacionada às exigências hídricas da espécie cultivada quanto à produtividade desejada, ao local de cultivo, ao estágio de desenvolvimento da cultura, ao tipo de solo e à época de plantio.

16.13 Funções de produção

O alto custo de implantação dos sistemas de irrigação, aliado à relação direta entre o custo de operação da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada, conduz cada vez mais à necessidade de se otimizar tanto o uso da água, com um bom manejo da irrigação quanto dos demais insumos de produção. Dos fatores complementares da produção agrícola, a água e a adubação são aquelas que mais limitam os rendimentos, quando se tem um bom material genético e um bom controle de pragas e doenças. Deste modo, as aplicações racionais da irrigação e da adubação são fundamentais para o aumento da produtividade e do retorno econômico na agricultura irrigada. Estas aplicações racionais tanto da irrigação quanto da adubação poderão ser conseguidas mediante o conhecimento das funções de produção das culturas nas diferentes regiões do País.

Define-se função de produção como a relação técnica entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produtividade física possível de se obter com a tecnologia existente.

Para quantificar os benefícios econômicos da irrigação, é necessário estimar o aumento na produtividade relacionado à quantidade de água aplicada. A representação gráfica ou matemática desta relação é denominada função de produção "água-cultura".

Uma função de produção água-cultura típica é quando se relaciona "lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura" *versus* "produtividade comercial". Outras maneiras de expressar funções de produção água-cultura são possíveis. Por exemplo, pode-se relacionar lâminas aplicadas por estágios de desenvolvimentos da cultura, ou evapotranspiração, ou tensão ou umidade do solo *versus* produtividade.

Na Figura 4, tem-se um exemplo clássico de uma função de produção "água-cultura", em que um menor incremento da lâmina aplicada no início da função de produção resulta em um incremento muito maior na produtividade.

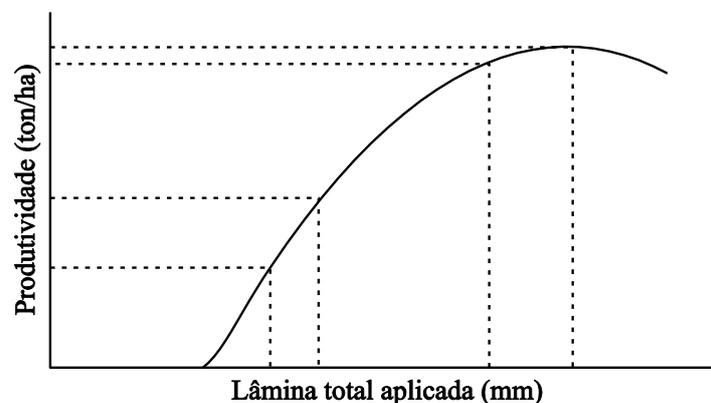


Figura 4. Exemplo típico de função de produção "água-cultura".

Normalmente, as expressões matemáticas das funções de produção “água-cultura” são do tipo linear, potencial e exponencial. Em geral, podemos expressá-las da seguinte forma:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

em que Y se refere à produtividade da cultura, e X_1 , X_2 e X_n aos fatores que afetam esta produtividade.

Trata-se de uma relação empírica, obtida normalmente por análise de regressão entre a variável dependente (produtividade) e uma ou mais variáveis independentes (entre elas, a lâmina de água aplicada), conforme o modelo proposto.

A função **água-cultura**, quando a produção é relacionada com a lâmina total aplicada, é normalmente representada por um modelo polinomial de segundo grau, da forma:

$$Y = a + b \cdot W + c \cdot W^2 \quad (3)$$

em que Y se refere à produtividade (kg ha^{-1} ou t ha^{-1}), W à lâmina total aplicada (mm), e a, b e c aos coeficientes de ajuste. Neste tipo de função, os valores de “a” e “c” geralmente são negativos.

Quando a produção é relacionada com evapotranspiração (ET), emprega-se, em geral, modelo linear (polinômio do primeiro grau), da forma $Y = a + b \cdot ET$, ou com o modelo preconizado pela FAO (DOORENBOS; KASSAN, 1979), relacionando decréscimo relativo de produtividade ($1 - Y/Y_{\text{max}}$), com o *deficit* relativo de evapotranspiração ($1 - ET_r/ET_c$) multiplicado pelo fator de produtividade da cultura irrigada (k_y).

16.14 Otimização física

Considerando a função de produção (equação 3), a produtividade máxima em relação à lâmina aplicada é obtida, derivando-se esta função em relação à lâmina aplicada e igualando o resultado a zero (equações 4 e 5).

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = b + 2 \cdot c \cdot W \quad (4)$$

Assim,

$$W_{\text{mpf}} = -\frac{b}{2 \cdot c} \quad (\text{lâmina que resultará na máxima produtividade física}) \quad (5)$$

16.15 Otimização econômica

Considerando como receita ou faturamento o valor arrecadado com a venda da produção e como custo a soma dos gastos ocorridos no processo de produção, o lucro ou rendimento será a diferença entre a receita e o custo da produção (Figura 5).

Sendo assim, a equação 6 representa a função que define o rendimento em relação à lâmina aplicada:

$$R = p_y \cdot Y - (p_a \cdot W + \dots + C_f) \quad (6)$$

em que R se refere ao rendimento da agricultura irrigada, p_y ao preço do produto, p_a ao custo da aplicação de água de irrigação (incluindo o custo de energia e mão de obra), e C_f ao custo fixo do sistema de irrigação.

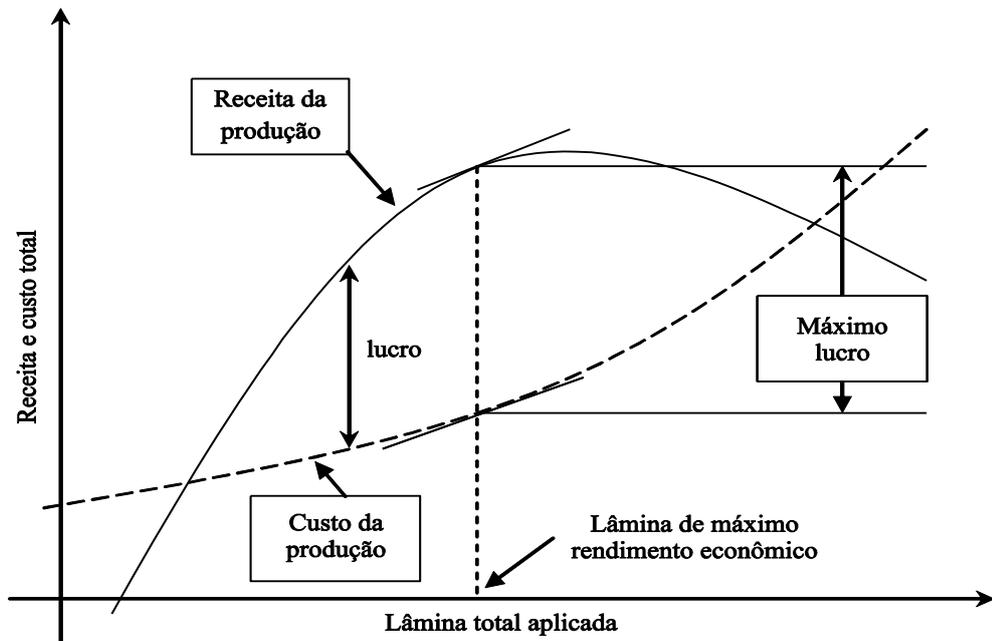


Figura 5. Relação entre receita e custo da produção versus lâmina total aplicada.

A lâmina de máximo rendimento econômico é obtida, derivando a equação 1.6 em relação à lâmina aplicada e igualando o resultado a zero (Equações 7 e 8).

$$\frac{\partial R}{\partial W} = \frac{\partial Y}{\partial W} p_y - p_a \quad (7)$$

Como $\frac{\partial Y}{\partial W} = b + 2 \cdot c \cdot W$ (Equação 1.4), tem-se:

$$W_{mre} = \frac{p_a - b \cdot p_y}{2 \cdot c \cdot p_y} \quad (\text{lâmina que resultará no máximo rendimento econômico}) \quad (8)$$

16.16 Ponto de equilíbrio

A partir da função que define o lucro (Equação 6), o ponto de equilíbrio ocorre quando o rendimento da produção irrigada se iguala ao seu custo (Equação 9).

$$p_y \cdot Y = (p_a \cdot W + C_f) \quad (9)$$

A solução analítica da equação 1.9 define a lâmina aplicada em que a receita se iguala ao custo de produção, ou seja, lâmina correspondente ao ponto de equilíbrio – W_{pe} (Equação 10).

$$W_{pe} = \pm \left[\frac{\sqrt{(-4 \cdot a \cdot c \cdot p_y^2 + b^2 \cdot p_y^2 - 2 \cdot b \cdot p_y \cdot p_a + 4 \cdot c \cdot C_f \cdot p_y + p_a^2) - b \cdot p_y + p_a}}{2 \cdot c \cdot p_y} \right] \quad (10)$$

16.17 Obtenção de dados no campo

Destaca-se a importância da qualidade e da quantidade de dados necessários para o estudo das funções de produção. Na obtenção de dados no campo para se ajustar a função de produção, deve-se trabalhar com, no mínimo, seis lâminas distintas, distribuídas uniformemente ao longo do ciclo da cultura, ou distribuídas por fase ou

estádio da cultura. Quando se trabalha com lâmina total por ciclo, os dados são mais fáceis de obter e analisar, mas não possibilitam a otimização da lâmina aplicada por fase ou estágio da cultura. Em contrapartida, quando se trabalha por fase ou estágio da cultura, apesar de maior dificuldade para gerar e analisar os dados, é possível variar as lâminas por fase, em função da maior ou menor sensibilidade ao *deficit* de água da cultura, nos diferentes estádios de seu desenvolvimento, e obter maior eficiência no uso da água.

A maioria dos cultivos anuais ou bianuais é sensível à variação da umidade do solo, de forma diferenciada por espécie, e, em cada espécie, ao longo das fases ou estádios do seu ciclo vegetativo. Assim, existem as fases mais sensíveis ao *deficit* de umidade do solo, denominadas fases críticas.

No cultivo irrigado, é de capital importância definir os estágios de desenvolvimento da cultura a fim de otimizar a eficiência de aplicação da água. Assim sendo, pode-se dividir o ciclo da maioria das culturas em quatro ou cinco estádios de desenvolvimento. É necessário ainda identificar os estádios mais críticos ao *deficit* hídrico e os não muito críticos. Existem estádios que respondem positivamente ao *deficit* hídrico, por exemplo o período de pré-floração do café, da manga, do limão, e o período de maturação da cana-de-açúcar. Na fruticultura, geralmente, um *deficit* de umidade no solo antes da floração evita o excesso de crescimento vegetativo, induz a formação de gemas florais, antecipa e aumenta a formação de botões florais.

Para o crescimento sustentado do cultivo irrigado no país, tanto o poder público quanto a indústria e os produtores devem estabelecer programas com ações integradas e sequenciais. Urge que os governos - Federal, Estadual e Municipal – tenham uma política regional de apoio financeiro à pesquisa de irrigação em cultivares de alto potencial produtivo, sob condições ótimas de adubação e fitossanidade.

16.18 Eficiência de uso de água

Define-se, na agricultura irrigada, eficiência de uso de água (EUA) como produtividade por unidade de lâmina aplicada. Considerando que só existe interesse prático analisar a *Eua* no intervalo de lâmina aplicada, que vai da lâmina correspondente ao ponto de equilíbrio (W_{pe}) à lâmina correspondente ao ponto de máxima produtividade física (W_{mpf}), é neste intervalo que se deve calcular a eficiência de uso de água na agricultura irrigada.

A partir da função de produção (Equação 3) que relaciona água aplicada e produtividade, a *Eua* pode ser representada matematicamente pela seguinte equação:

$$EUA = \frac{(a + b \cdot W + c \cdot W^2)}{W} = \frac{a}{W} + b + c \cdot W \quad (11)$$

Derivando em relação a W e igualando a zero, obtém-se W_{meua} , sendo esta a lâmina que resultará na máxima eficiência de uso de água (Equação 12).

$$W_{meua} = \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (12)$$

16.19 Rendimento por unidade de lâmina aplicada

Outra análise que se pode fazer é determinar o lucro ou rendimento por unidade de lâmina aplicada a partir da função que define o rendimento em relação à lâmina aplicada (Equação 6).

O lucro ou rendimento por unidade de lâmina aplicada (R_{ula}) será:

$$R_{ula} = \frac{[p_y \cdot Y - (p_a \cdot W + C_f)]}{W} \quad (13)$$

Derivando a equação 1.13 e igualando a zero, obtém-se W_{mrul} , que é a lâmina que resultará no máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada, (Equação 14).

$$W_{mrul} = \sqrt{\frac{a}{c} - \frac{C_f}{p_y \cdot c}} \quad (14)$$

Aqui também somente nos interessa valores de W_{mrul} , entre a lâmina correspondente ao ponto de equilíbrio (W_{pe}) e a lâmina de máxima produtividade física (W_{mpf}).

Deve-se notar que, diferentemente da lâmina para o máximo rendimento econômico (W_{mre}), a lâmina que resultará no máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) é independente do preço da água (p_a). Ela depende do preço do produto (p_y), do custo fixo do sistema de irrigação (C_f) e dos coeficientes "a" e "c" ajustados segundo a equação 3.

Analisando as equações de W_{meua} e de W_{mrul} (Equações 12 e 14), verifica-se que a lâmina responsável pelo máximo rendimento por unidade de lâmina (W_{mrul}) será sempre maior ou, em condições especiais, igual à lâmina que resultará na máxima eficiência de uso de água (W_{meua}). Quanto menor for o custo fixo do sistema de irrigação (C_f) e/ou maior for o preço do produto (p_y), a W_{mrul} mais se aproximará da W_{meua} . Caso o custo fixo do sistema de irrigação seja muito pequeno para o produtor, ou seja, amplamente subsidiado ou que ele já tenha o sistema de irrigação disponível em sua propriedade, a W_{mrul} será praticamente igual à W_{meua} .

16.20 Produtividade na agricultura irrigada

No Brasil, há poucos trabalhos visando à obtenção de funções de produção água-cultura das culturas irrigáveis nas diversas regiões. Serão apresentados na sequência alguns resultados de trabalhos realizados na Região Norte Fluminense para obtenção de funções de produção.

(i) Trabalho realizado em Campos dos Goytacazes-RJ, em 1996, objetivando determinar funções de produção da cana-de-açúcar em relação à lâmina de irrigação (SOUSA, 1997).

Na Figura 6, tem-se a relação entre produtividade de colmos e lâmina total aplicada. À medida que aumentou a quantidade de água aplicada (irrigação + precipitação efetiva), houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada.

Isso pode ser explicado pelo fato de a água ser um fator limitante à produção. À medida que se aumenta sua disponibilidade, a cultura pode expressar melhor o seu potencial produtivo até um determinado ponto, após o qual a produtividade passa a decrescer, devido ao excesso de água no solo, à baixa aeração na zona radicular e à lixiviação de nutrientes.

Com os dados obtidos na função de produtividade da cana-de-açúcar, utilizando o valor de $p_y = 35,00 \text{ R\$ t}^{-1}$, $C_f = 752,50 \text{ R\$ ha}^{-1}$ e $p_a = 2,058 \text{ R\$ mm}^{-1}$, juntamente com as equações 1.5; 1.8; 1.10; 1.12 e 1.14, obtiveram-se, respectivamente, as lâminas correspondentes: máxima produtividade física (W_{mpf}); máximo rendimento econômico

(W_{mre}); ponto de equilíbrio (W_{pe}); máxima eficiência de uso de água (W_{meua}) e máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) (Tabela 1).

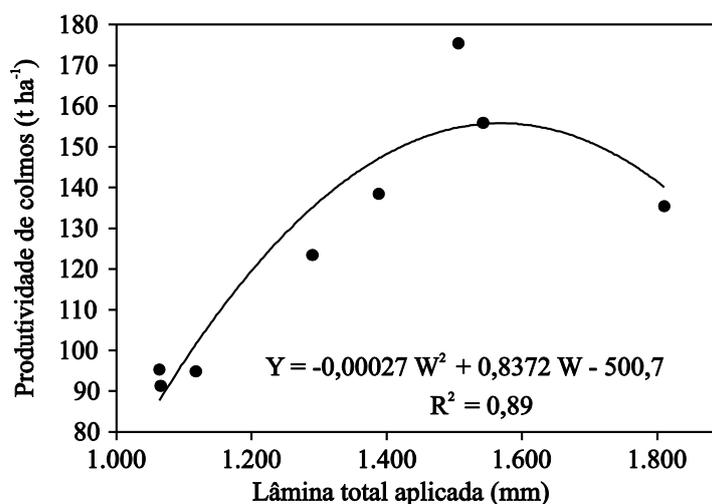


Figura 6. Produtividade da cana-de-açúcar, em t ha⁻¹ de colmos, em função da lâmina total aplicada, para variedade RB72454. Campos dos Goytacazes (RJ).

Tabela 1. Lâminas (L, mm), produtividades (P, t ha⁻¹) e eficiência de uso água (EUA, kg ha⁻¹ mm⁻¹) correspondentes obtidos a partir da função de produção água-cana-de-açúcar, variedade RB72454. Campos dos Goytacazes (RJ).

Produtividade	L	P	EUA	Rendimento	
				(R\$ ha ⁻¹)	(R\$ ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Máxima produtividade física	1.551	148,6			
Máximo produtividade econômica	1.442	145,4		1.369,10	
Máximo produtividade por lâmina	1.391	141,7			0,97
Máxima eficiência de uso de água	1.362	139,0	102,0		
Ponto de equilíbrio	1061	83,9			

(ii) Trabalho realizado em São Francisco do Itabapoana-RJ, em 1996-1997, objetivando determinar funções de produção da goiabeira em relação à lâmina total de água (SOUSA, 1997).

Na Figura 7, tem-se a relação entre produtividade comercial da goiabeira e a lâmina total aplicada. À medida que se aumentou a quantidade de água aplicada, houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada.

Com os dados obtidos na função de produtividade da goiabeira, utilizando o valor de $p_y = R\$ 1,20 \text{ kg}^{-1}$, $C_f = R\$ 3,70 \text{ planta}^{-1}$ e $p_a = 0,0103 \text{ R\$ planta}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, juntamente com as equações 1.5; 1.8; 1.10; 1.12 e 1.14, obtiveram-se, respectivamente, as lâminas correspondentes: máxima produtividade física (W_{mpf}); máximo rendimento econômico (W_{mre}); ponto de equilíbrio (W_{pe}); máxima eficiência de uso de água (W_{meua}) e máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) (Tabela 2).

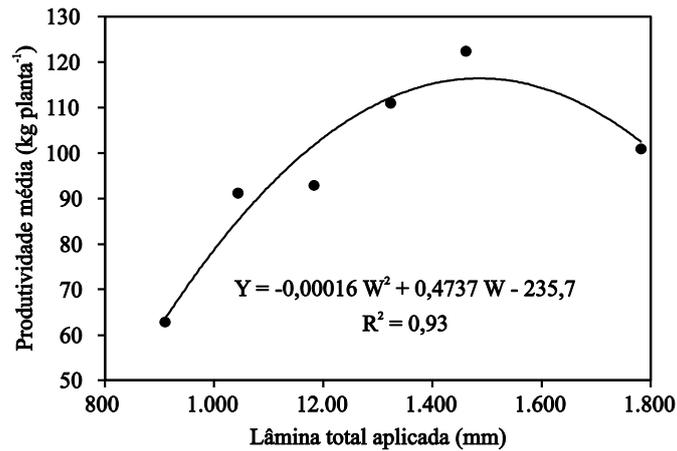


Figura 7. Estimativa de produtividade comercial da goiabeira, em kg planta⁻¹, em função da lâmina total aplicada. São Francisco de Itabapoana (RJ).

Tabela 2. Lâminas (L, mm), produtividades (P, t ha⁻¹) e eficiência de uso água (EUA, kg ha⁻¹ mm⁻¹) correspondentes obtidos a partir da função de produção água-goiabeira, variedade Ogawa. São Francisco de Itabapoana, RJ.

Produtividade	L	P	EUA	Rendimento	
				(R\$ pl ⁻¹)	(R\$ pl ⁻¹ mm ⁻¹)
Máxima produtividade física	1.480	114,8			
Máxima produtividade econômica	1.453	114,7		119,00	
Máxima produtividade por lâmina	1.222	104,1			0,09
Máxima eficiência de uso de água	1.214	103,5	85,2		
Ponto de equilíbrio	666	8,8			

(iii) Trabalho realizado em Campos dos Goytacazes-RJ, em 1996-1997, objetivando determinar funções de produção do maracujazeiro em relação à lâmina total de água (MARTINS, 1998).

Na Figura 8, tem-se a relação entre produtividade comercial do maracujazeiro e a lâmina total aplicada. À medida que aumentou a quantidade de água aplicada, houve incrementos positivos de produtividade até atingir um valor máximo. Após esse valor, houve decréscimo de rendimento com o aumento de lâmina total aplicada.

Com os dados obtidos na função de produtividade do maracujazeiro, utilizando o valor de $p_y = 0,20 \text{ R\$ kg}^{-1}$, $C_f = 2.895,00 \text{ R\$ ha}^{-1}$ e $p_a = 0,94 \text{ R\$ mm}^{-1}$, juntamente com as equações 1.5; 1.8; 1.10; 1.12; e 1.14, obtiveram-se, respectivamente, as lâminas correspondentes: máxima produtividade física (W_{mpf}); máximo rendimento econômico (W_{mre}); ponto de equilíbrio (W_{pe}); máxima eficiência de uso de água (W_{meua}) e máximo rendimento por unidade de lâmina aplicada (W_{mrul}) (Tabela 3)

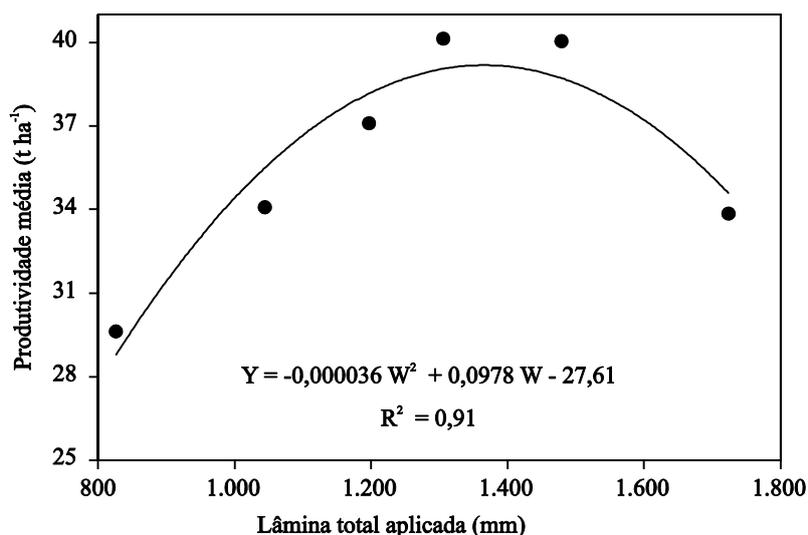


Figura 8. Estimativa da produtividade comercial do maracujazeiro ($t\ ha^{-1}$) em função da lâmina total aplicada. Campos dos Goytacazes (RJ).

Tabela 3. Lâminas (L, mm), produtividades (P, $t\ ha^{-1}$) e eficiência de uso água (EUA, $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$) correspondentes obtidos a partir da função de produção água-maracujazeiro. Campos dos Goytacazes, RJ.

Produtividade	L	P	EUA	Rendimento	
				(R\$ ha^{-1})	(R\$ $ha^{-1}\ mm^{-1}$)
Máxima produtividade física	1.363	39,1			
Máximo produtividade econômica	1.297	38,9		3.665,16	
Máximo produtividade por lâmina	1.083	36,2			3,08
Máxima eficiência de uso de água	877	30,6	34,9		
Ponto de equilíbrio	583	17,2			

16.21 Manejo do sistema de irrigação

Após a instalação do sistema e durante o primeiro ciclo de irrigação, é necessário avaliar e calibrar os equipamentos para garantir uma boa eficiência do sistema.

O acompanhamento, a análise e a avaliação de um sistema de irrigação são as bases para o seu correto manejo, devendo a avaliação ser realizada periodicamente. Um dos parâmetros de maior importância para se conduzir um sistema de irrigação é a medição da vazão, tanto a aplicada na irrigação quanto a vazão de escoamento no final da parcela, quando for o caso. Portanto, é muito importante para o desenvolvimento da irrigação no país a fabricação, a ampla difusão e o uso de medidores de vazão.

Todo projeto de irrigação que foi calibrado e, em consequência, ajustado, para que as demais irrigações sejam conduzidas com eficiência, permite que as operações de programação das irrigações, monitoramento e avaliação do sistema sejam mais

fáceis. Isso decorre da necessidade, para uma calibração, da instalação de estruturas e equipamentos que permitirão obter dados importantes para a análise do sistema, como vazão aplicada, vazão de escoamento no final da parcela, características de infiltração do solo, tempo de irrigação.

Infelizmente, muitos dos projetos de irrigação são instalados sem a devida avaliação e correto monitoramento, o que acarreta um baixo desempenho dos sistemas.

O ponto-chave no manejo da irrigação é decidir quando irrigar e quanto de água aplicar.

O quanto de água aplicar é normalmente calculado com base na quantidade consumida pela cultura, dividida pela eficiência de aplicação. A quantidade consumida pela cultura pode ser estimada por meio da evapotranspiração real ou por intermédio da variação do teor de umidade do solo. Todavia, tem sido mais comum o uso da evapotranspiração real. É óbvio que a quantidade de água a ser aplicada por irrigação tem de ser compatível com a capacidade de retenção de água na zona radicular da cultura.

A questão de quando irrigar, que é, sem dúvida, um dos pontos mais importantes no manejo da irrigação, pode ser determinada de diferentes modos: pela medição da deficiência de água na planta, pelo sintoma desta deficiência, pela disponibilidade de água no solo, pela evapotranspiração real, pelo turno de rega e pelo balanço de água no solo.

Um dos parâmetros que mais influenciam o quando irrigar é o tipo de distribuição de água no projeto de irrigação. São estes os principais tipos de distribuição de água em uso nos sistemas de irrigação com múltiplos usuários: (i) distribuição por demanda: a água está continuamente à disposição do usuário. É só abrir o registro ou a comporta e irrigar. Este tipo de distribuição é comum na França (assemelha-se ao nosso sistema de distribuição de água potável). Geralmente requer sistemas automatizados, (ii) distribuição por solicitação: o irrigante terá que comunicar à gerência do projeto com determinado número de dias de antecedência, normalmente de dois a sete, quando e quanto de água ele necessitará, (iii) distribuição contínua: neste caso, cada usuário receberá uma vazão contínua durante todo o ciclo de cultivo. Este método não deve ser recomendado quando a área a ser irrigada por usuários for pequena, pois a vazão será muito baixa, o que tornará muito difícil conduzir a irrigação, e (iv) distribuição em rotação: Cada irrigante receberá água com determinado intervalo de tempo. Este é um dos métodos mais usados, principalmente nos projetos de irrigação em que a área a ser irrigada de cada usuário for média ou pequena.

A distribuição de água no projeto de irrigação pode ser com intervalo e vazão constantes durante todo o ciclo da cultura; com intervalo variável e vazão constante ao longo do ciclo (maior intervalo nos períodos de menor demanda e menor intervalo no período de maior demanda); e com intervalo e vazão variáveis ao longo do ciclo da cultura.

Ao se tratar de sistema de irrigação para um único usuário, principalmente quando envolve o uso de motobomba e/ou longos canais ou tubulações, o tempo de funcionamento deverá ser o maior possível. Isso se aplica para diminuir sua ociosidade e aumentar a sua capacidade de irrigação por unidade de área. A prática também evita o superdimensionamento do sistema de irrigação, a não ser quando se tratar de miniprojetos, pois existe uma vazão mínima para poder conduzir satisfatoriamente a irrigação. A irrigação deverá ser conduzida em rotação entre as subparcelas do projeto, com o intervalo entre irrigação (turno de rega) e vazão variáveis ao longo do ciclo da cultura.

De modo geral, a questão de quando irrigar pode ser discutida sob dois aspectos, conforme abordado subseqüentemente.

16.22 Irrigação com turno de rega prefixado

Muitas vezes, em virtude das características de distribuição de água em sistemas de múltiplos usuários ou em razão da capacidade do sistema em relação à área a ser irrigada, tem-se de trabalhar com um turno de rega prefixado. Nesse caso, o turno de rega deve ser definido de modo que atenda somente a 70 a 80% da demanda evapotranspirométrica no período de maior demanda. Assim, antes do período de maior demanda evapotranspirométrica, a irrigação reporá ao solo toda a umidade consumida no intervalo entre cada duas irrigações, mantendo, assim, todo o perfil do solo com a máxima disponibilidade de água. No período de maior demanda evapotranspirométrica, já que o sistema não terá capacidade de suprir toda a água necessária, a planta completará suas necessidades, absorvendo a água das camadas mais profundas ou das precipitações pluviométricas que porventura ocorrerem nessa época; a lâmina real a ser aplicada por irrigação deverá ser igual ao somatório da ET_c, no período, para os sistemas com irrigação total, ou igual ao somatório da ET_c menos a precipitação efetiva, no período, para os sistemas com irrigação suplementar, ou seja:

(i) para irrigação total:

$$ITN = \frac{\sum_{i=1}^{TR} (ET_c)_i}{E_a} \quad (15)$$

(ii) para irrigação suplementar:

$$ITN = \frac{\sum_{i=1}^{TR} (ET_c_i - Pe_i)}{E_a} \quad (16)$$

em que ITN é a lâmina total a ser aplicada por irrigação (mm); ET_c_i a evapotranspiração da cultura no dia i (mm); Pe_i a precipitação efetiva no dia 1 (mm); e E_a a eficiência de aplicação (em decimal).

16.23 Irrigação com turno de rega variável

Sempre que possível, deve-se usar esse procedimento, que permite adequar a irrigação às diferentes fases do desenvolvimento vegetativo da cultura, bem como à variação da demanda evapotranspiratória ao longo do ciclo da cultura. Para o caso, podem-se usar quase todos os recursos já citados para decidir quando irrigar, ou seja, a medição da deficiência de água na planta, o sintoma desta deficiência, a determinação da umidade do solo e o balanço de água no solo. É mais comum, porém, decidir quando irrigar com base na determinação da umidade do solo ou no balanço de água no solo.

Quando a decisão de irrigar é baseada no teor de umidade do solo, tem-se de definir, *a priori*, qual nível de umidade no solo indicará quando irrigar. Esse nível deve ser definido em função da cultura, do órgão a ser colhido, da localização geográfica da área do projeto e das características de retenção de água do solo. Para a maioria das culturas, é comum usar a média entre o teor de umidade equivalente à "capacidade de campo" e o teor de umidade equivalente ao ponto de murchamento, sendo o correto que este valor seja determinado por meio de pesquisa, para cada cultura em cada tipo de solo da região.

Dentre os diversos métodos de determinação da umidade do solo, é mais comum usar, para determinação da época de irrigação, o método-padrão de estufa, o TDR, os métodos eletrométricos (método de Bouyoucos, de Colman e outros) e o tensiômetro. Esses dois últimos permitem a automatização do sistema no que diz respeito à decisão de quando irrigar.

O método de balanço de água no solo, sem dúvida, tem-se mostrado eficiente para programar as irrigações, ou seja, para definir quando irrigar. O método de balanço de água no solo é comumente usado em países com maior tradição na irrigação.

Matematicamente, o método balanço de água no solo é descrito pela equação 17.

$$D_i = D_{i-1} + ET_{ci} - P_{ei} \quad (17)$$

em que D_i é a lâmina de água consumida até o dia i , em mm ($D_i = 0$ quando o teor de umidade de solo for igual à "Capacidade de campo"); D_{i-1} a lâmina de água consumida até o dia anterior, em mm; ET_{ci} a estimativa da evapotranspiração real no dia i , em mm; e P_{ei} a precipitação efetiva do dia i (mm).

O balanço é feito periodicamente e, quando D_i atinge um valor preestabelecido aplica-se a irrigação, a depender da disponibilidade de água do solo que será usada entre duas irrigações sucessivas. Vale lembrar-se de que esse valor preestabelecido depende da capacidade de retenção de água do solo (em mm por cm de profundidade do solo), do tipo de cultura e da profundidade do seu sistema radicular. Para determinada cultura, em certo tipo de solo, o sistema radicular inicia na germinação e vai-se desenvolvendo ao longo do ciclo vegetativo. Assim, o valor preestabelecido que definirá quando irrigar será menor no início e crescerá até atingir o valor máximo, o que acontece, na maior parte das vezes, a partir do momento em que a planta atinge aproximadamente 60% do seu desenvolvimento vegetativo.

Na Figura 9 está ilustrado graficamente esse balanço. Quando a precipitação efetiva (precipitação – escoamento superficial) ou a irrigação excederem a lâmina de água consumida até aquele dia, a demanda da cultura (D) será reduzida para zero.

Sempre que o sistema de irrigação permitir, a lâmina a ser aplicada na irrigação não deverá reduzir D a zero, para que possa ser aproveitada alguma chuva que porventura ocorra após a irrigação.

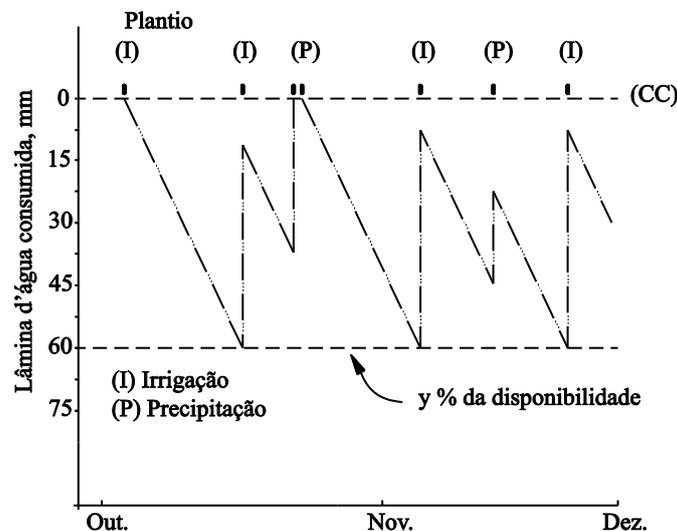


Figura 9. Esquema do balanço de água no solo.

Na Figura 10, é ilustrada a variação típica da disponibilidade da água no solo durante o ciclo de uma cultura irrigada por pivô central. As duas curvas mostram que se pode programar a irrigação de modo que seja mantido o teor de umidade mais elevado nos 30 cm da camada superior do solo e, ao mesmo tempo, permitir contínuo consumo da água das camadas inferiores. Nesse caso, ter-se-á muito pouca perda de água por percolação e maior aproveitamento das chuvas que porventura ocorrerem durante o ciclo da cultura (HEERMAN *et al.*, 1976).

É bem mais fácil programar quando e quanto irrigar nos sistemas de irrigação localizada e aspersão do que nos de irrigação por superfície, pois, na irrigação por sulco, o controle da irrigação depende não somente do sistema de irrigação, mas também, principalmente, das características de infiltração do solo, que variam conforme os tratos culturais, o número de irrigação, o tempo de avanço e de recessão, entre outros fatores.

Na prática, segundo Jensen *et al.* (1970), os usuários da irrigação não se têm mostrado muito sensíveis a melhorar o manejo da irrigação. Dentre as diversas causas, podem-se citar: (i) baixo custo da água de irrigação, em relação ao custo das práticas que melhorariam a eficiência de irrigação, (ii) dificuldade de qualificar e quantificar funções de produção que mostrem o decréscimo da produção em razão da falta ou do excesso de irrigação, (iii) falta de dados de campo para os que terão de decidir diariamente quando e quanto irrigar; e (iv) muitas vezes, nos projetos, as decisões sobre quando irrigar são relegadas a plano secundário.

Além do mais, é comum, nos meios empresarial, rural e governamental, acreditar-se que com poucas informações e rápido treinamento se pode transformar qualquer pessoa num especialista em irrigação.

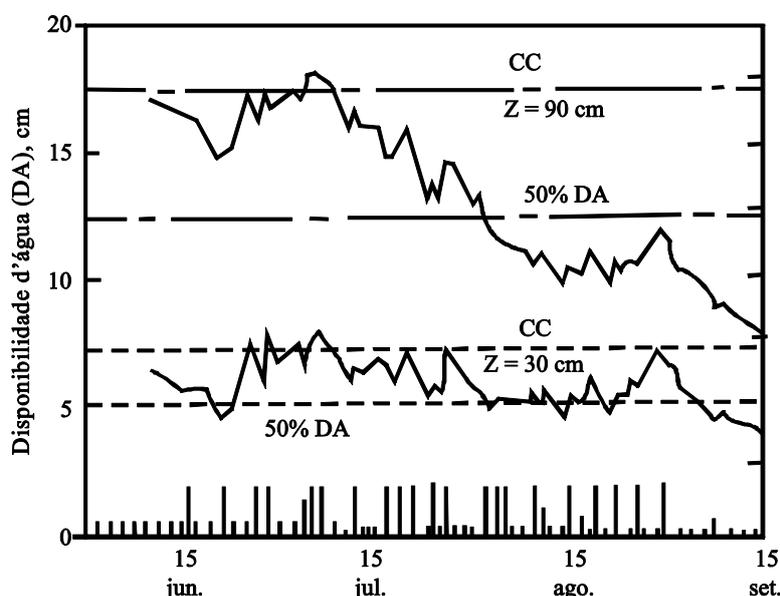


Figura 10. Variação típica da disponibilidade de água durante o ciclo de uma cultura irrigada por pivô central, em função da profundidade (Z).

16.24 Considerações finais

A água é um elemento essencial para vida e o seu uso eficiente e compartilhado tem sido uma exigência básica da sociedade. O conceito de sustentabilidade conduz para a busca do uso eficiente dos recursos disponíveis em geral e, em especial, na produção de alimentos, onde considera aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Assim a implantação e uso de sistemas de irrigação que possibilitem elevada eficiência no uso da água para produção de alimentos, fibras e agroenergia se tornam condições básicas para o desenvolvimento da agricultura irrigada brasileira.

A eficiência de irrigação passa por três aspectos básicos: (i) que a captação de água de um manancial ocorra dentro de critérios técnicos considerando a disponibilidade real de água; (ii) que o sistema de irrigação utilizado tenha elevada eficiência de aplicação de água; e, (iii) que a decisão da irrigação (manejo) seja feita em base a critérios técnicos que possibilitem a aplicação na quantidade e no momento adequado.

Nas considerações sobre eficiência de uso de água na agricultura irrigada é importante analisar de maneira ampla o meio ambiente. Deve-se evitar a salinização do solo e a contaminação dos recursos hídricos, avaliar a disponibilidade de água, executar o manejo de irrigação com base no sistema solo-planta-atmosfera. Também é necessário analisar os benefícios da irrigação dentro do âmbito da relação entre produtividade e disponibilidade de água. Buscar a maximização da produtividade por unidade de água aplicada - onde ela for limitada - ou a maximização da produtividade por unidade de área, com aumento do lucro ou outros parâmetros onde houver maior abundância dos recursos hídricos.

Importante considerar que a otimização da eficiência de uso da água na agricultura e em especial na agricultura irrigada seja feita em base técnica e científica. Para isso, a utilização das funções de produção em base física e econômica permitem a análise abrangente da situação e assim poderão ser tomadas decisões baseadas em aspectos econômicos, associados as questões sociais e ambientais.

Neste sentido, é importante a obtenção de informações confiáveis do sistema de produção (dados no campo), utilização de conceitos de eficiência de uso de água por unidade de lâmina de irrigação aplicada, por produtividade das culturas, etc. Para isto é fundamental que sistemas de irrigação tenham a adoção de critérios de manejo técnico em base a turnos de rega fixos ou variáveis.

No passado a irrigação fez parte de um processo de "luta contra seca", onde as dificuldades técnicas dos sistemas e os equipamentos utilizados com baixa eficiência do uso de água, nem eram considerados como questões importantes. Com o avançar do processo e a crescente demanda pelos recursos hídricos em quantidade e qualidade no presente, e cada vez mais no futuro, o uso eficiente da água na agricultura irrigada é questão básica. Isto envolve o desenvolvimento de projetos adequados, uso de equipamentos com elevado potencial de eficiência no uso de água, sistemas de automação e controle à distância, assim como sistemas de manejo em base técnica.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório pleno 2017. Brasília, ANA, 2017.

ALVES, E.M.; BERNARDO, S.; SILVA, J.F.; CONDE, A.R. Efeito de diferentes lâminas d'água sobre a produção de três cultivares de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, Mill.), com a utilização da irrigação por gotejamento. Revista Ceres, v.29, n.162, p.145-152, 1982.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da Irrigação no Brasil. In: SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. (Ed.). **Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável da Agricultura**. Brasília: MMA/SRH/ABEAS. Viçosa - MG. Departamento de Engenharia Agrícola, p.28-42, 1999.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da Irrigação no Brasil. Palestra proferida no II Workshop de Novas Tecnologias na Irrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE O USO MÚLTIPLO DA ÁGUA. Fortaleza-CE, 2008.

- BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. (Ed.). **Manejo de irrigação**. Lavras-MG. Ufla/Sbea, p.117-132, 1998.
- BERNARDO, S. Irrigação: total, suplementar, com *deficit* e de salvação. **Revista ITEM**, Brasília-DF, n.71/72, p.64-68, 2006.
- BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. In: XVI CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM - CONIRD. Goiânia-GO, 2006.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de irrigação**. 9. Ed., Viçosa-MG: Editora UFV, 545p., 2019.
- BRASIL. Lei 9433 de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, p. 470, 9 jan. 1997.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**. Rome: FAO, n.33, 193 p., 1979.
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W.O. Crop water requirements. **Irrigation and drainage paper**. Roma: FAO, n.24, 179 p., 1975.
- GARDNER, W. R. Soil water movement and root absorption. In: PIERRE H. *et al.* (Ed.). Plant environment and efficient water use. W. Madison: Ann. **Soil Science Society of America**, p.127-149, 1965.
- HANKS, R.J.; GARDNER, W.R.; FLORIAN, R.L. Plant growth - evapotranspiration relations for several crops in Central Great Plains. **Agronomy Journal**, v.61, p.30-34, 1969.
- HEERMANN, D.F.; HAISE, H.R.; MICKELSON, R.H. Scheduling center pivot sprinkler irrigation for corn production in eastern Colorado. **Transaction of the ASAE**, v.19, n.1, p.284-287, 1976.
- JENSEN, M.E.; ROBB, D.C.N.; FRANZOY, G.E. Scheduling irrigation using climate-crop-soil data. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.96 (IRI), p.25-38, 1970.
- JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; PRATT, B.J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transaction of the ASAE**, p.954-959, 1971.
- MARTINS, D.P. **Resposta do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims var. *flavicarpa*) a lâminas de irrigação e doses de nitrogênio e potássio**. 84p., 1998. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes-RJ, 1998.
- SOUSA, E.F.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J.A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três cultivares, em Campos dos Goytacazes-RJ. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v.19, n.1, p.28-42, 1999.
- SOUSA, E.F. **Função de produção da cana-de-açúcar e da goiabeira em relação à irrigação**. 119p., 1997. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes-RJ, 1997.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. FAO crop yields response to water. **Irrigation and Drainage Paper**, n.66, 2012.
- STEGMAN, E.C.; MUSICK, J.T.; STEWART, J.I. Irrigation water management. In: JENSEN, M.E. (Ed.). **Design and operation of farm Irrigation systems**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI, p.763-816, 1980.
- STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O. **Production functions and predicted irrigation programmes for a principal crop as required for water resources planning and increased water efficiency**: final report. Washington, D.C.: Department of Interior, 1976.

WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.108 (IR1), p.57-74, 1982.

CAPÍTULO 17

17 ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL

Durval Dourado Neto, Allan Delfino, Pedro Alves Quilici Coutinho, Rodnei Rizzo, Marcela Almeida de Araujo, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto, Pedro Abel Vieira Júnior, Roberto Rodrigues e Alysson Paolinelli

Resumo

Com o objetivo de caracterizar a sustentabilidade do meio rural, foi proposta uma metodologia para caracterização do desenvolvimento econômico, social e ambiental, e realizado um estudo específico para os estabelecimentos localizados na área rural nos 645 municípios do Estado de São Paulo. Em função dos resultados obtidos, conclui-se que: (i) objetivamente, a sustentabilidade do meio rural pode ser caracterizada por intermédio dos índices de desenvolvimento econômico, social e ambiental; (ii) a metodologia proposta é adequada para caracterização da sustentabilidade no meio rural utilizando a média geométrica, por ser mais restritiva, apresentando maior aderência aos valores atuais da sociedade, de valorizar o desenvolvimento social e ambiental; e (iii) em função da caracterização da sustentabilidade econômica, social e ambiental dos estabelecimentos localizados no meio rural nos 645 municípios do Estado de São Paulo, pode-se subdividi-los em quatro classes: (Classe A) classe inferior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor mínimo e o primeiro quartil, (Classe B) classe inferior intermediária, contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao primeiro quartil e a mediana, (Classe C) classe superior intermediária, contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente à mediana e ao terceiro quartil, e (Classe D) classe superior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao terceiro quartil e o valor máximo médio encontrado. Este trabalho foi baseado na Dissertação de Mestrado defendida pelo segundo autor junto à FGV, sob a orientação do primeiro autor, desenvolvido em cooperação com o grupo de políticas públicas (GPP) da Esalq/USP.

17.1 Introdução

A tempos discute-se sobre o desenvolvimento sustentável e os caminhos pelos quais a sociedade moderna poderá alcançá-lo. Essa não é uma tarefa trivial, uma vez que tal processo visa conciliar o desenvolvimento econômico, à preservação ambiental e ainda garantir uma adequada qualidade de vida a todos (WORSTER, 1991). Além disso, os problemas ambientais são sistêmicos e estão relacionados a cadeias complexas e interdependentes, nas quais há constantes compensações (*trade-offs*) não lineares (GIATTI *et al.*, 2016). Um exemplo deste processo seria o nexos existente entre a disponibilidade de água, a produção de alimentos e energia. Neste caso, à adequada oferta de água requer energia, já as diferentes formas de geração de energia demandam recursos hídricos, e em paralelo, água e energia são essências para a produção de alimentos (BENITES-LAZARO; GIATTI, 2020). Logo, o manejo de um determinado

serviço ambiental irá influenciar não somente o mesmo, mas também a todos os outros. Diante deste olhar, possíveis soluções “sustentáveis” requerem a mudança da percepção de todos, nos pensamentos, valores e comportamento. Para gerar tais soluções, é fundamental compreender nossos sistemas de produção e suas externalidades, tendo sempre no horizonte o equilíbrio entre o setor econômico, social e ambiental. Neste contexto, soma-se ainda o desafio de satisfazer nossas necessidades e aspirações atuais, sem que haja impactos negativos para as gerações futuras” (CAPRA, 1982, 1996).

Sabe-se que uma grande problemática atual é o combate a possível escassez de alimentos, a qual está relacionada às projeções de crescimento populacional e aos limites planetários. Conforme estudos da Organização das Nações Unidas (ONU), a crescente demanda por alimentos só será atendida com a utilização de técnicas de irrigação, sendo que 80% de todo acréscimo na produção dependerá dos recursos hídricos (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2017). Essa questão torna-se ainda mais preocupante quando notamos que grande parte dos recursos hídricos utilizados atualmente, já são dedicados a atividades agrícolas (em torno de 70%) e a consequente produção de alimentos. Em muitas localidades já existe uma grande tensão quanto ao uso dos recursos hídricos, sendo evidente a competição entre o uso da água para o abastecimento ou agricultura. Isso é ainda mais preocupante se considerarmos os dados divulgados pelo relatório de desenvolvimento humano da ONU (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2016). De acordo com tal relatório, no início do século 21, cerca de 1,1 bilhão de pessoas não tinham acesso a água potável. Ao manejar um recurso tão importante quanto a água é preciso compreender que sua escassez não se restringe somente a sua ausência física, mas também a sua baixa qualidade, má distribuição e em alguns casos, a apropriação por determinados atores sociais. No mais, é fundamental compreendermos a estreita relação entre a disponibilidade de água e o desenvolvimento social.

O histórico uso dos recursos naturais, especialmente o uso da água em todo o mundo é de longe cheio de problemas, causando preocupação em toda a humanidade. A escassez de água no planeta é reflexo do uso inconsciente deste recurso natural e, do manejo inadequado dela, trazendo preocupações futuras que poderão ser irreversíveis. Esse recurso apesar de ser renovável é fungível, visto que além da crescente população mundial, ainda nos deparamos com o constante desenvolvimento de alguns setores econômicos, entre eles o agrícola. É evidente a importância da agricultura para à existência humana, bem como em razão da representatividade que o agronegócio tem no Brasil, o qual corresponde a 21,5% do PIB nacional (BARROS; CASTRO, 2020). Diante deste contexto, devemos compreender o papel fundamental que a agricultura detém tanto para alavancar o desenvolvimento humano, quanto para preservar um recurso natural. No mais, temos que empregar a agricultura como ferramenta para reduzir as desigualdades sociais e regionais, haja vista, estar ela presente em todo território nacional, viabilizando assim o processo de desenvolvimento sustentável.

Para podermos assegurar o adequado desenvolvimento do setor agrícola, faz-se necessário que os mais diferentes atores sociais, dentre eles gestores e políticos, tenham uma perspectiva abrangente de como suas decisões influenciam a dinâmica sociodemográfica e o ambiente, assim como os impactos e desdobramento de tais decisões. Para isso é fundamental a concepção de índices e indicadores de fácil compreensão, grande abrangência e possibilidade de implementação, mesmo diante das limitações quanto a disponibilidade de dados. Um exemplo disto seria o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o qual é utilizado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) em seu relatório anual. Esse índice foi desenvolvido

em 1990, pelos economistas Amartya Sen e Mahbub ul Haq, com sua implementação após três anos e, desde então é amplamente utilizado. O cálculo do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é baseado no resultado de três combinações, sendo elas, expectativa de vida ao nascer, anos médios de estudo e anos esperados de escolaridade e, do PIB traduzido na renda per capita.

Apesar de muito utilizado para mensurar o desenvolvimento humano, este índice privilegia apenas o aspecto econômico do desenvolvimento, não abrangendo outros fatores muito importantes, e muito menos a sustentabilidade. De acordo com Sergio Ferraz de Lima, a sustentabilidade busca conciliar a questão ambiental com a questão econômica, incorporando o princípio básico da continuidade, onde nada pode ser sustentável se não for contínuo (LIMA, 2008). Portanto, é fundamental que haja uma interação harmoniosa não só entre estes dois pilares, mas sim entre os três pilares aqui descritos, incluindo o social. Daí criar um índice de desenvolvimento rural sustentável, tem por finalidade investigar outros indicadores para a literatura, em sinergia com aquela já abordada no IDH. Assim sendo, podemos afirmar que a sua criação é um exercício de aproximação das discussões sociológicas a utilização de modelos matemáticos, de modo a aferir os diferentes níveis de desenvolvimento, respeitando as características dos espaços rurais.

Portanto, o presente trabalho busca propor e avaliar meios para caracterizar objetivamente a sustentabilidade do meio rural. Além disso, para demonstrar a aplicabilidade da técnica proposta, a mesma é empregada nos estabelecimentos localizados no meio rural do Estado de São Paulo. Neste caso, optou-se por analisar o estado de São Paulo pelo fato dele ser líder no país em diversos setores do agronegócio, dentre eles: cana-de-açúcar, açúcar e etanol, laranja (60% da produção mundial), a olericultura (40% da produção nacional), produção de flores, entre outras culturas, respondendo por 20% do agro brasileiro (MALISZEWSKI, 2019).

17.2 Índice de desenvolvimento rural sustentável

Este estudo (DELFINO, 2021) considerou todos os 645 municípios do estado de São Paulo e suas especificidades (Figura 1). Para uma melhor compreensão dos processos envolvidos na sustentabilidade do meio rural, os índices desenvolvidos foram espacializados, tendo como base a malha de municípios do IBGE para o ano de 2019 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020). Sendo assim, para todo o território de cada um dos municípios, eram associados valores dos índices econômico, ambiental e social, assim como o índice de desenvolvimento econômico rural sustentável.

O método aqui proposto conta com fórmulas e índices concebidos especificamente para a caracterização da sustentabilidade. Todas essas ferramentas se baseiam nos três eixos do desenvolvimento sustentável, o econômico, o social e o ambiental. É fundamental também que se compreenda a estrutura metodológica desta técnica (Figura 2). Tal estrutura pode ser dividida em 3 níveis, sendo o primeiro correspondente as mais diversas características que compõe a sustentabilidade, e aqui abrangida por 2 índices relacionados ao eixo econômico, 2 referentes ao social e 3 relacionados ao ambiental (Figura 2). Já no segundo nível, esses índices são agregados por eixo, resultando, portanto, nos índices denominados econômico, social e ambiental. Por fim, no terceiro nível, busca-se uma caracterização abrangente da sustentabilidade rural, e conseqüentemente a confluência de todas as informações geradas em um único indicador, aqui descrito como o Índice de Desenvolvimento Rural Sustentável (IDRS).

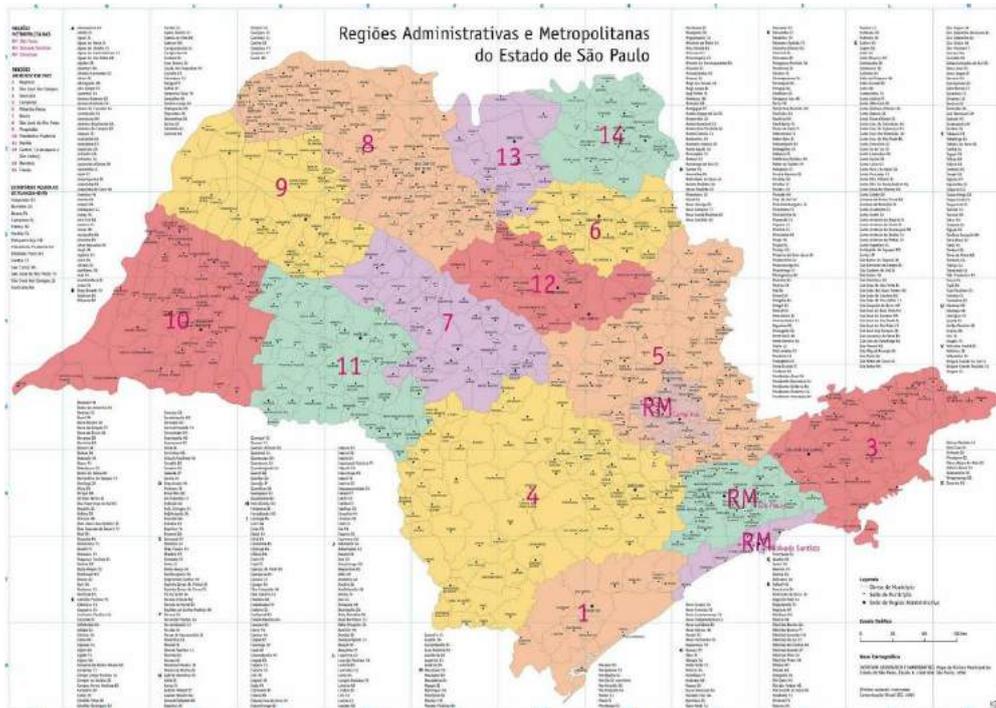


Figura 1. Mapa dos 645 municípios do Estado de São Paulo, especificando as regiões administrativas e metropolitanas do Estado de São Paulo (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, 2005).

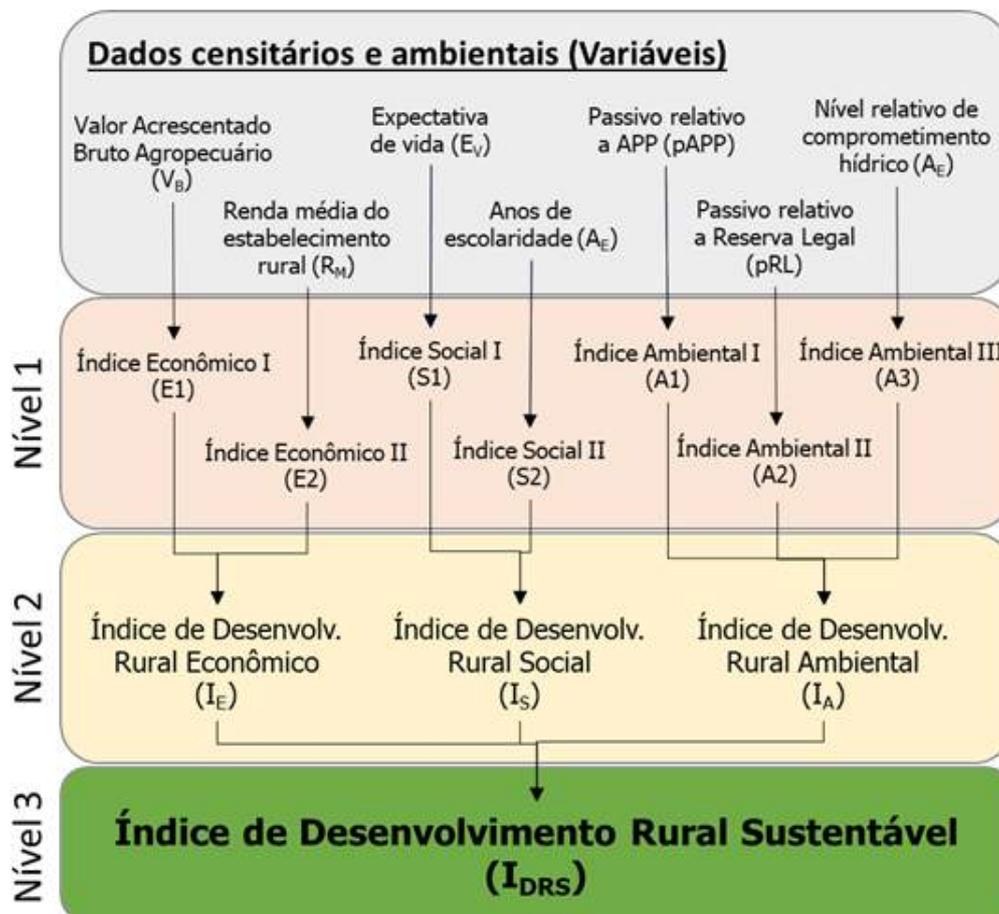


Figura 2. Estrutura metodológica para obtenção dos índices de desenvolvimento rural sustentável.

É importante observar que a base para a realização do método corresponde a obtenção de informações que indiquem as condições socioeconômica e ambiental dos municípios. Essas informações, chamadas a partir daqui de variáveis, são correspondentes a dados de levantamentos ambientais ou censitários (Figura 2). Informações referentes ao aspecto econômico correspondem ao valor acrescentado bruto agropecuário médio (V_B ; kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) e renda média do estabelecimento rural (R_M ; kR\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) (Tabela 1).

Tabela 1. Índices representando cada um dos eixos de desenvolvimento sustentável, as respectivas variáveis utilizadas nos cálculos, assim como os limites superior (LS) e inferior (LI), além de uma descrição das classes associadas aos índices.

Índice	Valor	Variável I	Variável II	Variável III	LI	LS	Classe	Descrição
Econômico	Mínimo	V_{Bn}	R_{Mn}	-	-	-	-	-
	Primeiro Quartil	V_{Bpq}	R_{Mpq}	-	n	(pq)	A	Classe inferior (25%)
	Mediana	V_{Bm}	R_{Mm}	-	pq	(m)	B	Classe intermediária inferior (25%)
	Média	$V_{B\mu}$	$R_{M\mu}$	-	-	-	-	-
	Terceiro Quartil	V_{Btq}	R_{Mtq}	-	m	(tq)	C	Classe intermediária superior (25%)
	Máximo	V_{Bx}	R_{Mx}	-	tq	x	D	Classe superior (25%)
Social	Mínimo	E_{Vn}	A_{En}	-	-	-	-	-
	Primeiro Quartil	E_{Vpq}	A_{Epq}	-	n	(pq)	A	Classe inferior (25%)
	Mediana	E_{Vm}	A_{Em}	-	pq	(m)	B	Classe intermediária inferior (25%)
	Média	$E_{V\mu}$	$A_{E\mu}$	-	-	-	-	-
	Terceiro Quartil	E_{Vtq}	A_{Etq}	-	m	(tq)	C	Classe intermediária superior (25%)
	Máximo	E_{Vx}	A_{Ex}	-	tq	x	D	Classe superior (25%)
Ambiental	Mínimo	APP_{rn}	RL_{rn}	N_{Chn}	-	-	-	-
	Primeiro Quartil	APP_{rpq}	RL_{rpq}	N_{Chpq}	n	(pq)	A	Classe inferior (25%)
	Mediana	APP_{rm}	RL_{rm}	N_{Chm}	pq	(m)	B	Classe intermediária inferior (25%)
	Média	$APP_{r\mu}$	$RL_{r\mu}$	$N_{Ch\mu}$	-	-	-	-
	Terceiro Quartil	APP_{rtq}	RL_{rtq}	$N_{Ch\mu}$	m	(tq)	C	Classe intermediária superior (25%)
	Máximo	APP_{rx}	RL_{rx}	N_{Chx}	tq	x	D	Classe superior (25%)

Abreviações: V_B : valor acrescentado bruto; R_M : renda média municipal ajustada; E_V : expectativa de vida; A_E : escolaridade; APP: área de preservação permanente; RL: área de reserva legal; N_{Ch} : nível de comprometimento hídrico. **Sufixos**: mínimo (n), primeiro quartil (pq), mediana (m), média (μ), terceiro quartil (tq) e máximo (x).

Para caracterização do aspecto social, considera-se a expectativa de vida (E_V ; Anos) e os anos de escolaridade (A_E ; Anos) (Tabela 1). O E_V é tido neste estudo como um conceito estatístico, indicativo da longevidade (tempo de vida) de uma determinada

população, estando este diretamente associado ao bem-estar do indivíduo. Já o A_E representa o grau de escolaridade de uma população específica, considerando um ciclo escolar de 0 a 20 anos. Tanto A_E quanto E_V foram elaborados com base em dados do Censo Agropecuário de 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE). É importante ressaltar ainda, que os dados de expectativa de vida podem ser encontrados no Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, criado pela FJP, Ipea e PNUD.

Os aspectos ambientais por sua vez, são representados pelos passivos referentes às áreas de preservação permanente (pAPP; $m^2 m^{-2}$) e reserva legal (pRL; $m^2 m^{-2}$), assim como o nível relativo de comprometimento hídrico (N_{CH} ; $m^3 m^{-3}$). Neste contexto, os passivos ambientais aqui descritos podem ser compreendidos como a obrigação legal dos estabelecimentos rurais com a restauração das áreas de APP e RL, e, portanto, o comprometimento de recursos financeiros na restauração ambiental. O N_{CH} estabelece uma relação entre a demanda total de retirada de água e a disponibilidade dos recursos hídricos, onde os usos consuntivos são realizados.

17.2.1 Caracterização dos estabelecimentos municipais de acordo com os índices econômicos, sociais, ambientais e o índice de sustentabilidade

Uma vez que a base de dados preliminar foi preparada e as informações censitárias organizadas, o próximo passo consistiu em converter cada uma destas informações nos índices de primeiro nível (Figura 2). Essa conversão das variáveis em índices demandou o emprego de modelos matemáticos, os quais serão descritos em detalhes nos tópicos abaixo. No mais, vale ressaltar que os índices concebidos variam entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhores as condições da localidade avaliada.

17.2.2 Índices de 1º nível

17.2.2.1 Índice Econômico I - Valor Acrescentado Bruto (E_1)

Para o cálculo do valor acrescentado bruto agropecuário médio (V_{B_i} , R\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) referente ao i -ésimo do município do Estado de São Paulo, tem-se que:

$$V_{B_i} = \frac{\sum_{j=1}^{ne_i} VAB_{i,j}}{ne_i} \quad (1)$$

em que $VAB_{i,j}$ é o valor acrescentado bruto do j -ésimo estabelecimento rural do i -ésimo município do Estado de São Paulo (R\$ ano⁻¹), ne_i o número de estabelecimentos do i -ésimo município.

O valor do índice correspondente ao valor acrescentado bruto agropecuário (E_{1_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{V_{B_i}}{V_{B_x}} \quad (2)$$

$$E_{1_i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot e_1 \cdot (m + x_i)}} \quad (3)$$

em que V_{B_i} é o valor acrescentado bruto agropecuário médio (R\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, V_{B_x} o valor acrescentado

bruto agropecuário médio (kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i o valor acrescentado bruto agropecuário médio relativo (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, n o valor mínimo a ser estimado pelo modelo ($n = 0,01$), m o valor da mediana e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 3) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 2).

Tabela 2. Valores bases do índice correspondente ao valor acrescentado bruto agropecuário (E_1) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 3).

V_B	x	e_1	Classe
V_{Bn}	x_n	0,00	Muito baixo
V_{Bpq}	x_{pq}	0,10	Baixo
V_{Bm}	x_m	0,30	Médio
V_{Btq}	x_{tq}	0,60	Muito bom
V_{Bx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.2 Índice Econômico II -Renda média municipal ajustada (E_2)

Para o cálculo da renda média municipal ajustada (R_{M_i} , kR\$ estabelecimento ano⁻¹), tem-se que:

$$R_{M_i} = \frac{\sum_j^{ne_i} R_{i,j}}{ne_i} \quad (4)$$

em que $R_{i,j}$ é a receita do j -ésimo estabelecimento rural do i -ésimo município do Estado de São Paulo (kR\$ ano⁻¹), ne_i o número de estabelecimentos do i -ésimo município.

O valor do índice correspondente à renda média municipal ajustada (E_{2_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{R_{M_i}}{R_{M_x}} \quad (5)$$

$$E_{2_i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot e_2 \cdot (m + x_i)}} \quad (6)$$

em que R_{M_i} é a renda média municipal ajustada (kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, R_{M_x} a renda média municipal ajustada (kR\$ município⁻¹ ano⁻¹) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a renda média municipal ajustada relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 6) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 3).

Tabela 3. Valores bases do índice correspondente à renda média municipal ajustada (E_2) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 6).

R_M	x	e_2	Classe
R_{Mn}	x_n	0,00	Muito baixo
R_{Mpq}	x_{pq}	0,05	Baixo
R_{Mm}	x_m	0,15	Médio
R_{Mtq}	x_{tq}	0,30	Muito bom
R_{Mx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.3 Índice Social I - Expectativa de vida (S_1)

O valor do índice correspondente ao valor acrescentado bruto agropecuário (S_{1_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{E_{V_i}}{E_{V_x}} \quad (7)$$

$$S_{1_i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot S_1 \cdot (m + x_i)}} \quad (8)$$

em que E_{V_i} é a expectativa de vida (anos) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, E_{V_x} a expectativa de vida (anos) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a expectativa de vida relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 8) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 4).

Tabela 4. Valores bases do índice correspondente à expectativa de vida (S_1) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva s_1) do modelo (equação 8).

E_V	x	s_1	Classe
E_{Vn}	x_n	0,05	Muito baixo
E_{Vpq}	x_{pq}	0,20	Baixo
E_{Vm}	x_m	0,40	Médio
E_{Vtq}	x_{tq}	0,70	Muito bom
E_{Vx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.4 Índice Social II - Escolaridade (S_2)

O valor do índice correspondente à escolaridade (S_{2_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{A_{E_i}}{A_{E_x}} \quad (9)$$

$$S_{2_i} = 1 - \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot s_2 \cdot (m + x_i)}} \quad (10)$$

em que R_{M_i} é a escolaridade (anos) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, R_{M_x} a escolaridade (anos) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a escolaridade relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 10) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 5).

Tabela 5. Valores bases do índice correspondente à escolaridade (S_2) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 10).

A_E	x	s_2	Classe
A_{E_n}	x_n	0,00	Muito baixo
$A_{E_{pq}}$	x_{pq}	0,05	Baixo
A_{E_m}	x_m	0,30	Médio
$A_{E_{tq}}$	x_{tq}	0,50	Muito bom
A_{E_x}	x_x	1,00	Excelente

17.2.2.5 Índice Ambiental I - Área de preservação permanente relativa (A_1)

O valor do índice correspondente à área de preservação permanente relativa (A_{1_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão (Modelo Tipo II):

$$x_i = \frac{pAPP_i}{pAPP_x} \quad (11)$$

$$A_{1_i} = \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot a_1 \cdot (m + x_i)}} \quad (12)$$

em que APP_{r_i} é a área de preservação permanente relativa ($m^2 \cdot m^{-2}$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, APP_{r_x} a área de preservação permanente relativa ($m^2 \cdot m^{-2}$) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a área de preservação permanente relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e e_1 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 12) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 6).

Tabela 6. Valores bases do índice correspondente à área de preservação permanente relativa (A_1) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva a_1) do modelo (equação 12).

APPr	x	A_1	Classe
APPr _n	X_n	0,05	Muito baixo
APPr _{pq}	X_{pq}	0,20	Baixo
APPr _m	X_m	0,40	Médio
APPr _{tq}	X_{tq}	0,70	Muito bom
APPr _x	X_x	1,00	Excelente

17.2.2.6 Índice Ambiental II - Área de reserva legal relativa (A_2)

O valor do índice correspondente à área de reserva legal relativa (A_{2_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{pRL_i}{pRL_x} \quad (13)$$

$$A_{2_i} = \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot a_2 \cdot (m + x_i)}} \quad (14)$$

em que RL_{r_i} é a área de reserva legal relativa ($m^2 m^{-2}$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, R_{M_x} a área de reserva legal relativa (anos) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i a área de reserva legal relativa (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e a_2 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 14) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 7).

Tabela 7. Valores bases do índice correspondente à área de reserva legal relativa (A_2) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva e_1) do modelo (equação 14).

RLr	x	a_2	Classe
RLr _n	X_n	0,000	Muito baixo
RLr _{pq}	X_{pq}	0,025	Baixo
RLr _m	X_m	0,200	Médio
RLr _{tq}	X_{tq}	0,500	Muito bom
RLr _x	X_x	1,000	Excelente

17.2.2.7 Índice Ambiental III - Comprometimento hídrico relativo (A_3)

O valor do índice correspondente ao nível de comprometimento hídrico relativo (A_{3_i}), referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$x_i = \frac{N_{CH_i}}{N_{CH_x}} \quad (15)$$

$$A_{3_i} = \frac{1 - n}{1 + \left(\frac{x_i}{m}\right)^{2 \cdot a_3 \cdot (m + x_i)}} \quad (16)$$

em que N_{CH_i} é o nível de comprometimento hídrico relativo ($m^3 m^{-3}$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, N_{CH_x} o nível de comprometimento hídrico relativo ($m^3 m^{-3}$) do município do Estado de São Paulo com maior valor (neste caso, $x_i = 1$), x_i o nível de comprometimento hídrico relativo (variável adimensional auxiliar, em que $0 \leq x_i \leq 1$) referente ao i -ésimo município do Estado de São Paulo, e a_3 o parâmetro empírico (fator de forma da curva) do modelo (equação 16) determinado por intermédio de análise de regressão não linear utilizando o Software Table Curve 2D (Tabela 8).

Tabela 8. Valores bases do índice correspondente ao nível de comprometimento hídrico relativo (A_3) e da variável auxiliar x (referentes aos 645 municípios do Estado de São Paulo) para estimar o parâmetro empírico (fator de forma da curva a_3) do modelo (equação 16).

N_{CH}	x	a_3	Classe
N_{CHn}	x_n	0,05	Muito baixo
N_{CHpq}	x_{pq}	0,20	Baixo
N_{CHm}	x_m	0,40	Médio
N_{CHtq}	x_{tq}	0,70	Muito bom
N_{CHx}	x_x	1,00	Excelente

17.2.3 Índices de 2º nível

17.2.3.1 Índice de desenvolvimento rural econômico

O índice de desenvolvimento rural econômico (I_E) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_E = \sqrt{E_1 \cdot E_2} \quad (17)$$

em que E_1 é o índice referente ao valor acrescentado bruto agropecuário, e E_2 o índice referente à renda média ajustada.

17.2.3.2 Índice de desenvolvimento rural social

O índice de desenvolvimento rural social (I_S) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_S = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad (18)$$

em que S_1 é o índice referente ao índice referente à expectativa de vida, e S_2 ao índice referente aos anos de escolaridade, considerando um ciclo escolar de 0 (valor mínimo) a 20 anos (valor máximo).

17.2.3.3 Índice de desenvolvimento rural ambiental

O índice de desenvolvimento rural ambiental (I_A) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_A = \sqrt{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \quad (19)$$

em que A_1 é o índice referente ao índice referente à área de preservação permanente relativa, A_2 o índice referente à área de reserva legal relativa, e A_3 o índice referente ao nível de comprometimento hídrico relativo.

17.2.4 Índice de 3º nível - Desenvolvimento Rural Sustentável

O índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$I_{ESAr} = \sqrt[3]{I_E \cdot I_S \cdot I_A} \quad (20)$$

em que I_E é o índice de desenvolvimento rural econômico, I_S o índice de rural social, e I_A o índice de desenvolvimento rural ambiental.

17.3 Estudo de caso: o desenvolvimento rural sustentável no estado de São Paulo

17.3.1 Desenvolvimento econômico no meio rural

Ao avaliar o valor agregado bruto nos diversos municípios do estado de São Paulo, nota-se que o valor médio observado foi de MR\$ 81 município⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 9). Contudo, em alguns poucos casos o V_B mostrou-se até 10 vezes maior que a média estadual (Figura 3A). Tal fato é observado no extremo Norte do estado, na região de Barretos, Orlandia e Franca (quadrante 48°W/50°W x 20°S/21°S) (Figura 3A). Essa superioridade decorre da concentração da atividade canavieira nestes locais, a qual gera o produto de maior valor agropecuário (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021). Outro exemplo similar é observado nos municípios à extremo Sul do estado, representado pela região de Itapeva, Itapetininga e Registro (quadrante 48°W/50°W x 23°S/25°S). Neste caso, a concentração é impulsionada não somente pela cana, mas também pelo cultivo da laranja, do tomate de mesa e de cereais (milho e soja) em Itapeva, a banana em Registro e uma gama de variedade em Itapetininga (laranja, carne de frango, uva de mesa, soja e milho, entre outros).

Os destaques no extremo Sudeste do mapa (quadrante 46°W/48°W x 23°S/24°S) estão relacionados às regiões de Mogi das Cruzes e Sorocaba (Piedade e Ibiúna). Nessas regiões se sobressaem as atividades de granjeiros (ovos), cultivo de frutas (caqui), o cultivo de folhagens (beterraba, repolho e verduras) e a criação de gado leiteiro. Todas estas atividades se renovam muito rápido, sendo a alta rotatividade responsável por impulsionar os dados da região, apesar das culturas não gerarem um alto valor agregado (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021). No extremo Oeste do

estado (quadrante 50°W/52°W x 22°S/23°S), há superioridade da região de Presidente Prudente, Assis e Marília. Tal fato se deu pela concentração canavieira em Assis e Ourinhos, da carne bovina e do café beneficiado em Marília, e também da atividade canavieira em Presidente Prudente. Ademais, é importante indicar a contribuição considerável de outras variantes favoráveis, estas desenvolvidas basicamente em função da prosperidade do setor agrícola e demais atividades dependentes ou correlatas (KAGEYAMA, 2004).

Tabela 9. Valores mínimo, primeiro quartil, mediana, média, terceiro quartil e máximo referentes ao valor acrescentado bruto agropecuário médio (V_B , kR\$ município⁻¹ ano⁻¹), renda média municipal ajustada (R_M , kR\$ estabelecimento⁻¹ ano⁻¹) [índice Econômico], expectativa de vida (E_V , anos), anos de escolaridade (A_E , anos), considerando um ciclo escolar de 0 a 20 anos [índice Social] passivo relativo de APP ($pAPP$, m² m⁻²), passivo relativo de área de RL (pRL , m² m⁻²), nível relativo de comprometimento hídrico (N_{CH} , m³ m⁻³) [índice Ambiental].

Valor	Índice						
	Econômico		Social		Ambiental		
	V_B	R_M	E_V	A_E	$pAPP$	pRL	N_{CH}
Mínimo	0	0,0	71,49	5,000	0,007487	0,0000	0,000002
Primeiro Quartil	25.366	148,0	74,10	8,959	0,286409	0,3495	0,033502
Mediana	52.405	261,4	75,19	9,735	0,378804	0,5954	0,075875
Média	81.091	383,0	75,16	9,707	0,384880	0,5219	0,127085
Terceiro Quartil	103.334	495,6	76,15	10,539	0,489586	0,7333	0,165404
Máximo	831.100	2631,2	78,37	12,997	0,787642	0,9367	1,000000

Dentre as regiões avaliadas, pode-se notar que Pindamonhangaba e Guaratinguetá, localizadas no extremo Leste do estado (quadrante 44°W/48°W x 22°S/24°S), tiveram ínfima representação no mapa do agronegócio. O V_B destas localidades é reduzido devido a pouca diversidade de culturas nesta região. O seu principal produto é a carne bovina e o leite, uma vez que tais regiões são acidentadas e de baixa aptidão a agricultura, tendo como melhor aproveitamento a pecuária (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021).

Outro aspecto importante na análise econômica é a renda média dos estabelecimentos municipais. Neste caso, observou-se um valor médio de R_M , correspondente à kR\$ 383,0 estabelecimento⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 9) no Estado de São Paulo.

Analisando os mapas da R_M (Figura 3B), nota-se boa concordância entre a mesma e o V_B de determinadas regiões. Um exemplo disto é o Norte e extremo Oeste do Estado de São Paulo (quadrante 48°W/50°W x 20°S/21°S), correspondente a região de Barretos, Orlandia e Franca, ou a região de Presidente Prudente, Assis e Marília (quadrante 50°W/52°W x 22°S/23°S). Nessas localidades, nota-se que a renda média é alta, primeiro porque a atividade canavieira é a de maior concentração, e segundo por ela ser de maior valor acrescentado bruto entre os produtos agropecuários. Além disso, percebe-se uma outra importante relação entre o tamanho das propriedades e a renda. Tal relação é devido a concentração de grandes propriedades canavieiras, a qual reflete na maior concentração de renda nos municípios naquelas regiões (CASER *et al.*, 2012, 2019; DELFINO, 2021).

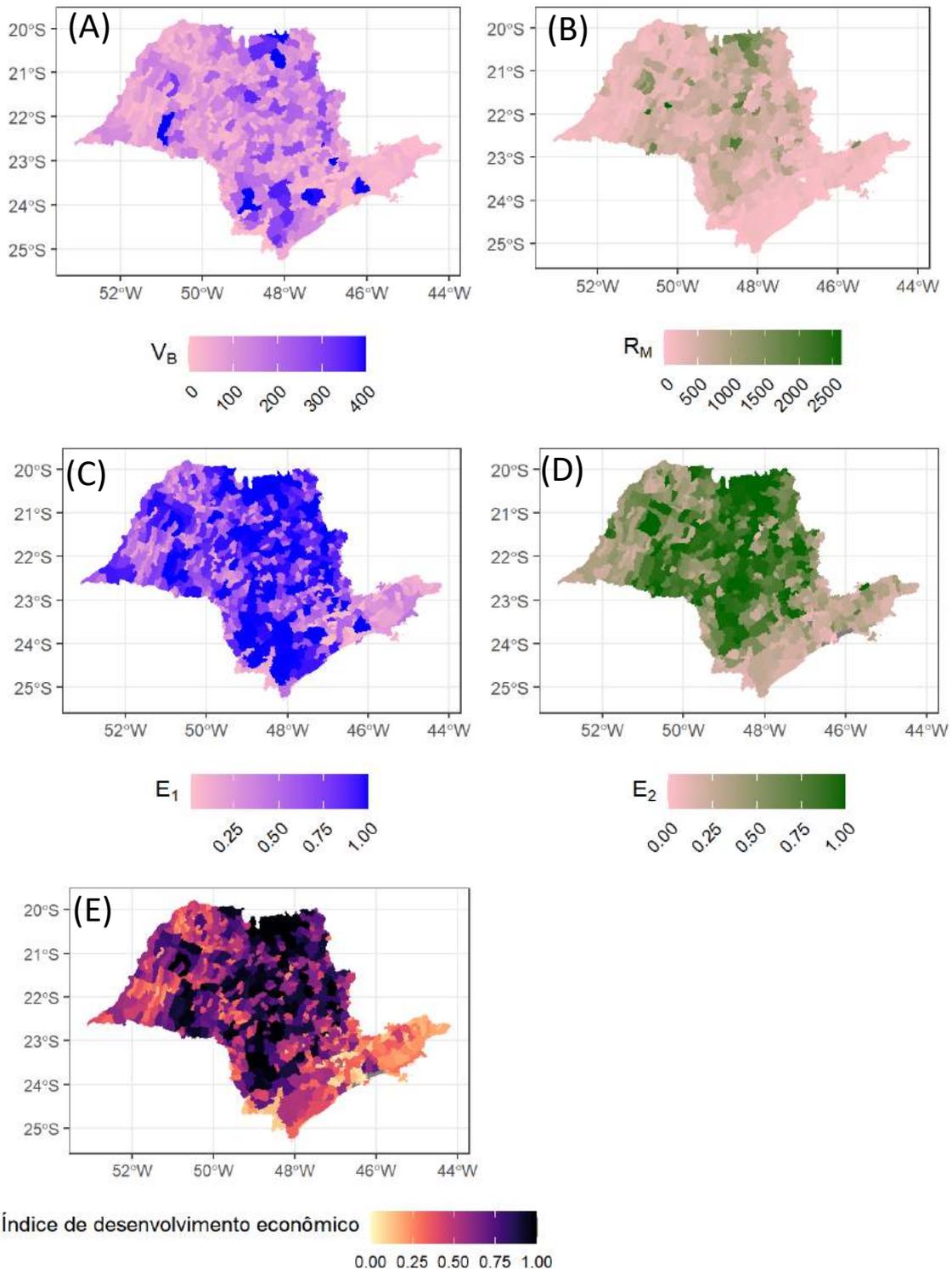


Figura 3. Mapas representando a distribuição espacial do Valor Agregado Bruto (V_B) (A), da renda média (R_M) (B), dos índices E_1 (C) e E_2 (D), assim como do índice de desenvolvimento rural econômico.

No extremo Sul do estado, na parte inferior do mapa (quadrante 48°W/50°W x 23°S/24°S), nota-se ligeira discordância entre V_B e R_M . Tal localidade corresponde a região de Itapeva, a qual está ligada a produção do tomate de mesa, este cultivado em pequenas propriedades rurais. Devido aos pequenos e numerosos estabelecimentos

rurais, a renda é bastante diluída. Isso não é exclusividade apenas do cultivo de tomate, processo semelhante ocorre com a produção de frango e ovos em Itapetininga e a banana em Registro.

Já nas regiões de Pindamonhangaba e Guaratinguetá, no extremo Leste do estado (quadrante 44°W/48°W x 22°S/24°S), os valores de R_M encontrados se mostram bem inferiores. Conforme já mencionado, a região (serrana) possui baixa aptidão agrícola, sendo mais aproveitada pela pecuária (leiteira e de corte) e seus muitos pequenos produtores, além de um baixo valor agregado do leite. Uma relação similar é observada no cinturão verde de Mogi das Cruzes e Sorocaba (Piedade e Ibiúna), onde a baixa renda é decorrente da grande quantidade de produtores rurais (CASER *et al.*, 2019).

Tendo em vista os padrões de variação da V_B e R_M nos municípios do estado de São Paulo, assim como o índice de desenvolvimento econômico (I_E) derivado delas (Figura 3C, D, E), fica evidente a capacidade do I_E em representar, na íntegra, a situação do desenvolvimento econômico estadual. Vemos uma grande superioridade da região Norte em relação as outras regiões, e uma inferioridade absoluta encontrada na região Sudeste do estado em razão das demais regiões do estado. Além de tudo, restou demonstrado que a parte Central do estado, apresentou bons números considerando a média estadual (Figura 3E).

17.3.20 Desenvolvimento social no meio rural

O desenvolvimento social está intimamente relacionado a expectativa de vida, a qual é compreendida como indicador de bem-estar. No caso de estado de São Paulo, a expectativa de vida média foi de 75,16 anos de idade (Tabela 9). A variação da E_V nos municípios se mostrou baixa, com um mapa predominantemente homogêneo (Figura 3A). Conforme descrito pelo SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados), a diferença entre os valores regionais extremos, em 2019, foi de 2,3 anos, valor este menor do que a observada em 2000 (4,5 anos). Tal redução sugere tendência de aproximação regional, resultante de ganhos expressivos em regiões com menores níveis de longevidade. Considerando regiões de menor longevidade, porém com ascendente expectativa de vida, é importante observar o extremo Sul do estado (quadrante 46W/50W x 23S/25S), onde localiza-se a antiga "região da fome" no estado, especialmente de Itapeva para baixo no Vale da Ribeira (Guapiara, Apiaí, Barra do Chapéu e Itaóca). Esta região foi por anos esquecida e, o reflexo disso na questão social demora muito para ser recuperado. Além disso, é importante sempre levar em conta que os habitantes da zona rural apresentam, em sua grande maioria, uma vida difícil, com muitas agruras e dissabores, em face da vulnerabilidade social (SOARES *et al.*, 2015).

Neste estudo, a escolaridade média dos municípios paulistas foi de 9,7 anos, considerando um ciclo de 0 a 20 anos (Tabela 9). No mais, não houve distinção da escolaridade média em relação aos municípios do estado. Em todos os quadrantes do mapa, seja ela de Norte a Sul ou de Leste a Oeste (Figura 4B), com raras exceções de índices mais elevados em algumas regiões ricas como Franca, São Joaquim da Barra, Votuporanga, São José do Rio Preto e Barretos na região Norte; Pindamonhangaba, Jundiaí, Campinas no Sudeste; Botucatu e Piracicaba no Centro Sul do Estado; Lins e Marília no Centro Oeste; e na região no Sudoeste Paulista a cidade de Presidente Prudente, importante ressaltar que todas elas são sedes de Universidades renomadas.

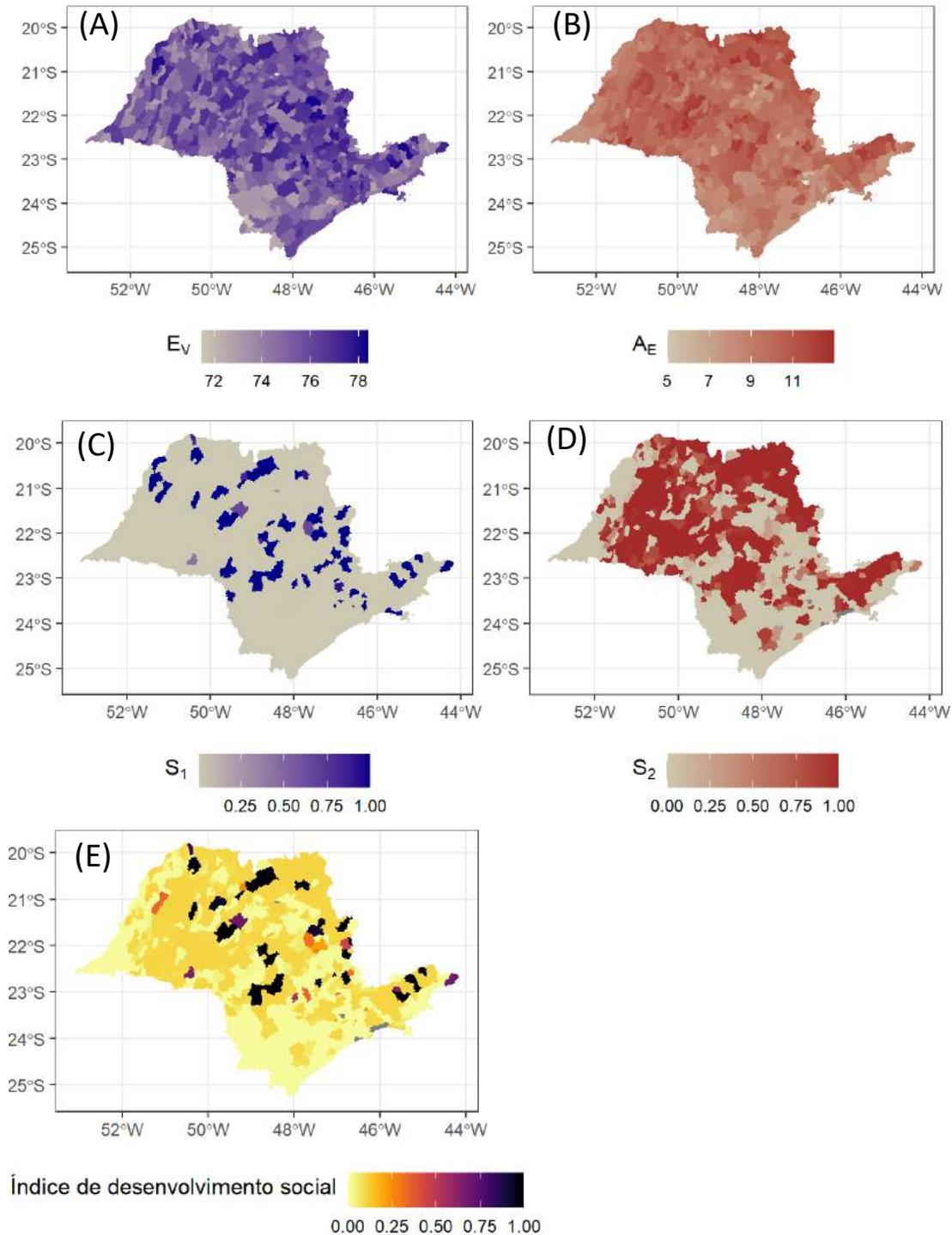


Figura 4. Mapas representando a distribuição espacial da Expectativa de vida (E_V) (A), da Escolaridade média (A_E) (B), dos índices S_1 (C) e S_2 (D), assim como do índice de desenvolvimento rural social.

Outro aspecto de grande relevância para o bem-estar e conseqüentemente a expectativa de vida, é o grau de escolaridade. A escolaridade possui um efeito direto na formação da renda e, de acordo com Langony (1973), ela influencia mais que fatores como sexo, idade, região e posição na ocupação. As disparidades de rendimentos, causadas pelo baixo nível de educação, advém, das diferenças existentes entre os indivíduos quanto aos seus atributos produtivos, geradas principalmente no período da

infância e, da adolescência, fase em que se acumula capital humano. Quando uma população tem muito pouca escolaridade, a qualidade da força de trabalho geralmente é baixa e homogênea. Em caso extremo, a maioria dos trabalhadores é analfabeta ou só tem o primário (BARROS *et al.*, 2002).

Por fim, com base nos mapas referentes aos índices sociais S_1 , S_2 , e no índice de desenvolvimento social (Figura 4C,D,E), fica evidente a capacidade dos mesmos em representar os aspectos sociais das regiões do estado. Neste caso, verifica-se uma inferioridade na região Sul do estado, que conforme destacado anteriormente possui um histórico de problemas sociais, sendo esta região negligenciada por muitos anos pelas políticas públicas.

17.3.3 O Desenvolvimento ambiental no meio rural

17.3.3.1 Os passivos ambientais relacionados a áreas de preservação permanente e reserva legal

Avaliando os valores relativos dos passivos ambientais de APP e RL, nota-se que as áreas médias a serem recuperadas correspondem à 0,38 m² m⁻² e 0,5219 m² m⁻², respectivamente (Tabela 9). À primeira vista, percebe-se que o *deficit* de passivo da RL é muito mais abrangente que o das APPs. Isto pois a RL corresponde a uma parcela expressiva das propriedades rurais, com valores na ordem de 20% dos imóveis.

Além disso, ao se avaliar os mapas de pApp e pRL (Figura 4A,B), observa-se discrepâncias consideráveis entre as regiões do estado. No extremo Sul (quadrante 46°W/48°W x 24°S/25°S), as variáveis de preservação apresentam-se mais elevadas. Está região, por se tratar de uma larga faixa litorânea com alta declividade, inviabiliza a atividade agrícola e inibe o surgimento de passivos ambientais. Além disso, nesta localidade existe uma extensa reserva de Mata Atlântica. Decorrente destes fatos, os índices de preservação apresentam-se mais elevados. De qualquer maneira, vale ressaltar que existem passivos a serem recuperados, na ordem estimada entre 10 e 20% do que se deve preservar.

Já no extremo Leste do estado (quadrante 44°W/46°W x 22°S/24°S), tem-se valores de passivos ambientais acima da média. Neste caso, a área encontra-se próxima a região costeira, com grande parte de suas superfícies onduladas, portanto impossibilitando a agricultura mecanizada. Por outro lado, tais condições não inviabilizam outras atividades, como a pecuária de corte e de leite, a qual predomina nesta região (Taubaté, Pindamonhangaba e Guaratinguetá). Tal fato explica o impacto ambiental acima da média, com um passivo estimado em 50% do total.

No extremo Norte do estado de São Paulo (quadrante 46°W/50°W x 20°S/21°S), observa-se que a região de Barretos, Orlandia e Franca, detém reduzida área de APP a se recuperar. Esta maior adesão à restauração das APPs está relacionada ao fato da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) ter trabalhado em algumas frentes domésticas e internacionais para introduzir algumas iniciativas de sustentabilidade no setor regional. Iniciativas como o Protocolo Verde e o projeto RenovAção, foram implementados visando práticas relacionadas à conservação do solo e da água, à proteção da vegetação ripária, a redução dos gases de efeito estufa e o uso responsável de pesticidas (CHADDAD, 2017). Um fato interessante nesta região é que o passivo referente a RL não segue a mesma tendência da APP. Ou seja, apesar da baixa necessidade de se restituir as áreas de preservação permanente, há grande necessidade de estabelecer as RL.

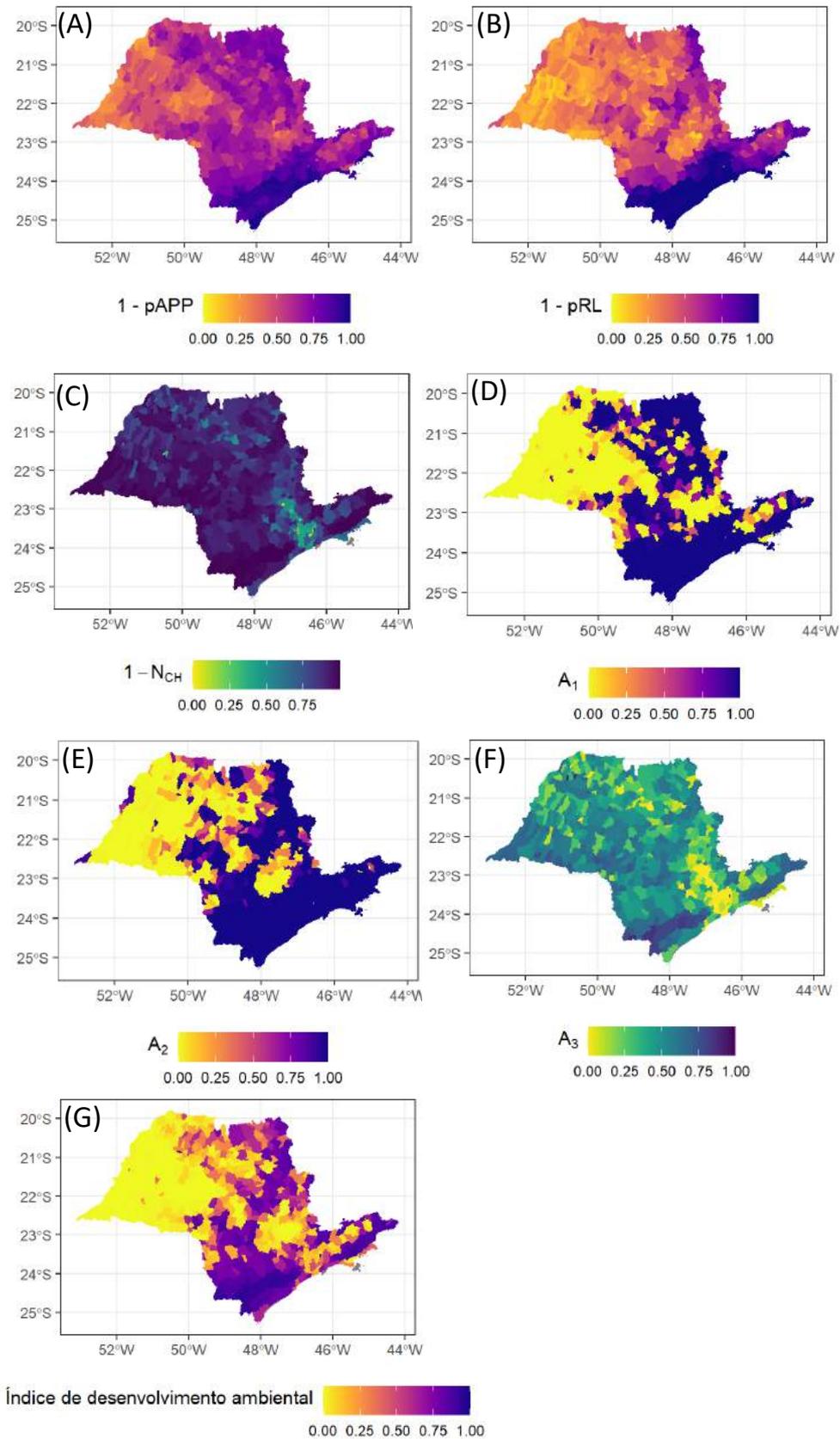


Figura 5. Mapas representando a distribuição espacial do passivo relativo referente as APPs (A) e RLs (B), assim como o nível relativo de comprometimento hídrico (C), e os índices ambientais A₁ (D), A₂ (E), A₃ (F) e o índice de desenvolvimento rural social (G).

Por último, tem-se o extremo Oeste (quadrante 48°W/54°W x 20°S/23°S), que abrange as regiões de Presidente Prudente, Assis e Marília. Esta é a localidade que possui menor cobertura vegetal, impactando diretamente os resultados deste trabalho, apresentando os maiores deficits de passivo ambiental, tanto para APP quanto RL.

No mais, verifica-se a importância da legislação ambiental e de áreas protegidas, como Unidades de Conservação e Área de Proteção de Mananciais, para manutenção de baixos valores de passivos ambientais. Exemplo de área protegida por lei é o Parque Estadual (Estação Ecológica do Jataí), localizado na cidade de Mogi-Guaçu (quadrante 46°W/48°W x 21°S/22°S).

17.3.3.2 O Nível de Comprometimento Hídrico no Estado de São Paulo

Além dos passivos ambientais, outro aspecto de grande relevância para a sustentabilidade rural é o Nível Relativo de Comprometimento Hídrico. Neste caso, tem-se um valor médio de 0,12 m³ m⁻³ de água a ser preservada ou conservada (Tabela 9) para os municípios do Estado de São Paulo. Neste contexto, observa-se que as regiões tanto ao Norte quanto ao Sul apresentam níveis de comprometimento baixo a moderado (Figura 5C). No extremo Leste e Sudeste do estado, (quadrante 44°W/48°W x 21°S/24°S), a situação é mais crítica. Isso se dá em grande parte à alta concentração demográfica e consequente necessidade de abastecimento dos centros urbanos. Além disso, tem-se uma região altamente agricultável e bastante diversificada, concentrando os dois cinturões verde do estado, com as regiões de Mogi das Cruzes e de Sorocaba, bem corroborado pelo mapa da Demanda Global (Figura 5C).

Já o extremo Oeste e parte do Noroeste do estado (quadrante 50°W/54°W x 20°S/23°S), detém coeficiente hídrico bem dividido. Em parte do Noroeste, os índices encontrados são reflexos da unidade hidrográfica dos rios Peixe e Aguapeí. Neste caso a demanda fica abaixo da média disponível, além das reservas subterrâneas que são muito utilizadas nesta zona do estado. No restante da região Noroeste, o coeficiente hídrico sofre uma maior demanda, ficando o uso destes recursos hídricos acima da média, conforme estudo da DAEE (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, 2006). Neste mesmo estudo, são indicados os conjuntos das Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) (situadas, em sua maioria, nas porções Norte e Oeste do Estado), as quais apresentam demandas de irrigação que superam as de outros setores (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, 2006).

Ao se avaliar o NC_H , é importante considerar a inter-relação existentes entre o recurso hídrico e aspectos socioeconômicos. O NC_H impacta diretamente na produtividade agrícola e, conseqüentemente traz reflexos diretos na renda média ajustada e no valor acrescentado bruto. Não por coincidência, os melhores índices encontrados estão perfeitamente relacionados nos quadrantes onde existem maior disponibilidade hídrica e tecnologia de irrigação adequada para suprir as demandas necessárias (Figura 6).

Por isso, observa-se a importância da manutenção e disponibilidade deste recurso em todas as propriedades rurais, para se obter uma melhor análise do IDRS. Diante de todo exposto, inserimos a disponibilidade hídrica na composição do IDRS, pois ela impacta diretamente na produtividade e, conseqüentemente traz reflexos diretos na renda média ajustada e valor acrescentado bruto, além de ser uma variável ambiental que tem ligação direta com a sustentabilidade. No mais, é importante refletir que o Brasil é um país rico em recursos hídricos, mas nem por isso não possui *deficit* hídrico. Muito embora este recurso seja abundante, ele é mal distribuído no território. Além disso, a política pública para utilização desse recurso deixa a desejar e é favorecida pelo

aumento populacional, o crescimento desordenado das cidades e um consumo excessivo e sem controle.

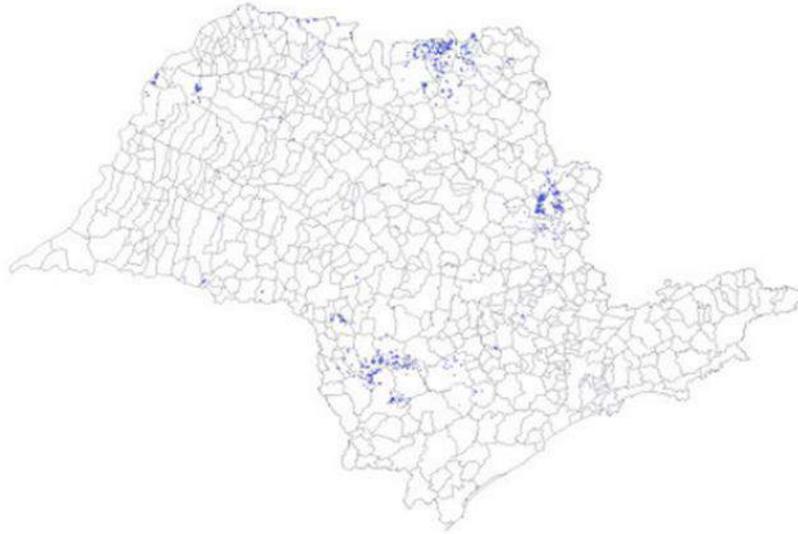


Figura 6. Irrigação existente pelo sistema de pivô central no Estado de São Paulo (DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, 2006).

17.3.3.3 O Índice de Desenvolvimento Rural Ambiental para o estado de São Paulo

Decorrente das variáveis pAPP, pRL e NC_H foram estabelecidos os índices A_1 , A_2 , A_3 , e estes foram agregados no índice de desenvolvimento rural ambiental (I_A) (Figura 4C,D,E,F). Com base nestas informações demonstrou-se que o I_A representa na íntegra a situação atual das regiões do estado, considerando os índices relativos do eixo ambiental. No mais, verificou-se uma grande superioridade positiva da região Sul em relação as outras regiões, com pouco passivo a recuperar (Figura 4). Além disso, foram encontrados números preocupantes na região Oeste, visto que é uma grande região produtora no estado de São Paulo. Por fim, observou-se um enorme passivo ambiental dentro do triângulo paulista (Campinas, Sorocaba e São Paulo), visto que, essas regiões comportam grandes centros urbanos.

17.4 Índice de desenvolvimento rural sustentável

Com base nos valores encontrados do índice referente ao desenvolvimento rural sustentável, referentes ao estado de São Paulo, foi observada a síntese no mapa (Figura 7), a qual representa na íntegra a situação atual do estado. O panorama geral apresenta pouca disparidade, exceto na região Oeste, com números mais negativos que a média geral. Portanto, esta região merece um olhar mais cuidadoso do poder público para ajudar na solução dos problemas ali apresentados. Ademais, apenas três localidades apresentaram números acima da média, sendo elas, Barretos, Avaré e Botucatu.

O índice foi também categorizado em baixo, médio, alto e muito alto, considerando o que consta em todos os mapas analisados, verifica-se: (i) superioridade demonstrada que vai desde as região central do estado até o Norte do estado, (ii) regularidade apresentada dentro das regiões Sul e Sudeste do estado, com exceção ao triângulo paulista por força da alta taxa de urbanização, e (iii) inferioridade da região Oeste do estado com índices bastante ruins, que se deve acender um sinal de alerta para esta região, devendo o estado implementar uma política mais próxima nesta região

quanto aos índices ali encontrados.

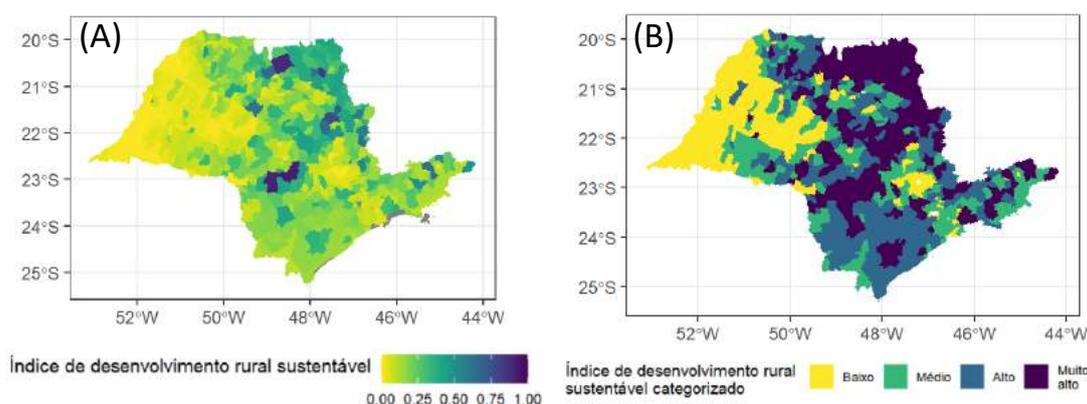


Figura 7. Índice referente ao desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) (A) e sua versão categorizada (I_{CESA}) (B).

17.5 Considerações finais

Em função dos resultados obtidos, conclui-se que a sustentabilidade do meio rural pode ser caracterizada por intermédio dos índices de desenvolvimento econômico, social e ambiental. Além disso, a metodologia descrita é adequada para caracterização da sustentabilidade no meio rural utilizando a média geométrica, por ser mais restritiva apresentando maior aderência aos valores atuais da sociedade de valorizar o desenvolvimento social e ambiental. Por fim, em função da caracterização da sustentabilidade econômica, social e ambiental dos estabelecimentos localizados no meio rural nos 645 municípios do Estado de São Paulo, pode-se subdividi-los em quatro classes, sendo elas: (Classe A) classe inferior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor mínimo e o primeiro quartil; (Classe B) classe inferior intermediária contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao primeiro quartil e a mediana; (Classe C) classe superior intermediária contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente à mediana e ao terceiro quartil; (Classe D) classe superior contendo 25% dos municípios do Estado de São Paulo com os valores do índice de desenvolvimento rural sustentável (econômico, social e ambiental) (I_{ESA}) entre o valor correspondente ao terceiro quartil e o valor máximo.

Referências

- BARROS, G.S.C.; CASTRO, N.R. Centro de Estudos avançados em economia aplicada (Cepea). PIB-Agro/Cepea: PIB do agronegócio encerra 2019 com alta de 3,81%. 2020. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-pib-do-agronegocio-encerra-2019-com-alta-de-3-81.as.px>. Acesso em: 7 abr. 2021.
- BARROS, R.P.; HENRIQUES, R.; MENDONÇA, R. **Pelo fim das décadas perdidas**: educação e desenvolvimento sustentado no Brasil. Rio de Janeiro, Ipea, 2002.
- BENITES-LÁZARO; L.L.; GIATTI; L.L. **O nexa água-energia-alimentos**: desafios da integração de políticas. Diálogos Socioambientais na Macrometrópole Paulista, v.3, n.9, p.16-18, 2020.
- CAPRA, F. **A teia da vida**. Tradução de Newton Roberval Eichenberg. 16. Ed. São Paulo: Editora Pensamento-Cultrix. 1996.

- CAPRA, F. **O ponto de mutação**. Tradução de Álvaro Cabral. 10. Ed. São Paulo: Editora Pensamento-Cultrix. 1982.
- CASER, D.V.; SILVA, J.R.; COELHO, P.J.; BUENO, C.R.F.; PINATTI, E.; GHOBRIL, C.N.; BINI, D.L.C. **Análises e indicadores do agronegócio**. 2019. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14613>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- CASER, D.V.; TSUNECHIRO, A.; COELHO, P.J.; BUENO, C.R.F.; PINATTI, E.; FILHO, E.P.C.; BINI, D.L.C. **Análises e indicadores do agronegócio**, v.7, n.6, jun., 2012. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=12382>. Acesso em: 10 abr. 2021.
- CHADDAD, F. **Economia e organização da agricultura brasileira**. Tradução Paula Diniz. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- DELFINO, A. Caracterização da sustentabilidade do meio rural no estado de São Paulo. 179p., 2021. Dissertação (Mestrado) - Escola de Economia de São Paulo (MPAGRO). Fundação Getúlio Vargas. 2021.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos: 2004 / 2007 **Resumo**. São Paulo, DAEE, 92p., 2006. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/CRH/1133/perh.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2021.
- DOURADO NETO, D. Notas de aula: Índice de desenvolvimento rural sustentável. Piracicaba: Esalq/USP. 10p. 2011.
- GIATTI, L.L.; JACOBI, P.R.; FAVARO, A.K.M.I.; EMPINOTTI, V.L. O nexos água, energia e alimentos no contexto da Metrópole Paulista. **Estudos Avançados**, v.30, n.88, p.43-61, 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142016.30880005>. Acesso em: 18. abr. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Área territorial oficial. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/principal.shtm>. Acesso em: 15 mai. 2020.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO. IGC. 2005. Disponível em: http://www.igc.sp.gov.br/produtos/regioes_adm.html. Acesso em: 30 abr. 2021.
- KAGEYAMA, A. **Desenvolvimento rural: conceito e medida**. Cadernos de Ciência e Tecnologia - Embrapa. Brasília, v.21, n.3, p.379-408, dez., 2004. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8702>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- LANGONI, C.G. **Distribuição da renda e desenvolvimento econômico do Brasil**. Rio de Janeiro, Expressão e Cultura, 1973.
- LIMA, F.A.R. **O direito ambiental nas constituições do Brasil: um breve relato de sua construção histórica e o artigo 225 CF/88 com cláusula pétrea**. 2014. Disponível em: http://ambitojuridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=14555. Acesso em: 19 mar. 2021.
- LIMA, S.F. Introdução ao conceito de sustentabilidade aplicabilidade e limites. Faculdades Integradas do Brasil. **Caderno da Escola de Negócios**, v.4, n.4, 2008.
- MALISZEWSKI, E. São Paulo é 20% do agro brasileiro. **Agrolink**. 2019. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/sao-paulo-e-20--do-agro-brasileiro_425136.html#:~:text=Hoje%20S%C3%A3o%20Paulo%20%C3%A9%20o,bilh%C3%B5es%20de%20litros%20de%20etanol. Acesso em: 8 mar. 2021.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. 2013. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/itapetininga-regiao/noticia/2013/07/ribeirao-branco-tem-o-pior-idh-municipal-do-estado-de-sao-paulo.html>. Acesso em: 24. abr. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos**. 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acao/agua/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **O índice de desenvolvimento humano municipal brasileiro**. PNUD-BRASIL. 2016. 96p. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/idh/Atlas/o-idh-brasileiro0.html>. Acesso em: 8 mar. 2021.

SOARES, R.A.S.; MORAES, R.M.; VIANNA, R.P.T.; PESSOA, V.M.; CARNEIRO, F.F. **Determinantes socioambientais e saúde: O Brasil rural versus o Brasil urbano**. 2015. *Tempus, actas de saúde coletiva*, Brasília, v.9, n.2, p.221-235, 2015. Disponível em: <https://www.tempusactas.unb.br/index.php/tempus/article/view/1718>. Acesso em 15 mar. 2021.

WORSTER, D. Para fazer história ambiental. Rio de Janeiro, **Revista Estudos Históricos**, v.4, n.8, p.198-215, 1991.

CAPÍTULO 18

18 FERTIRRIGAÇÃO: ASPECTOS RELEVANTES E VIABILIDADE TÉCNICA X FINANCEIRA

Luiz Fabiano Palaretti e Alexandre Barcellos Dalri

Resumo

Os benefícios e limitações da fertirrigação são elucidados de forma ampla na literatura. No entanto, os aspectos econômicos e algumas nuances acabam sendo pouco exploradas, principalmente no que tange a viabilidade econômica do processo, com enfoque na relação entre os custos de produção operacional e as necessidades da planta. Neste capítulo buscamos inicialmente preparar o leitor para os tópicos mais básicos da fertirrigação e suas particularidades, na sequência apresentar a dinâmica de equipamentos e suas principais características e finalizamos com a apresentação de um estudo de caso real de uma propriedade agrícola do Noroeste do Estado de São Paulo, que compara os custos de operação de fertilização aplicada de forma convencional com a aplicação de fertilizantes via água de irrigação na cultura dos citros.

18.1 Introdução

A temática da oferta versus produção de alimentos é amplamente debatida e neste contexto surgem diversas especulações, em alguns momentos, fracamente embasadas em critérios técnicos e agrônômicos.

Produzir alimento em quantidade já é um desafio alcançado, o problema hoje se delinea em aspectos de logística, locação de centros de distribuição, que estão diretamente ligados à qualidade do produto final e sua vida de prateleira.

Assim, a qualidade de um produto é definida no campo de produção, uma vez que, após obtido o produto é muito difícil agregar valor nutricional e, ou melhorar seus aspectos qualitativos. Considerando esta narrativa, partimos do pressuposto que o uso de técnicas que contemplem o aumento da produção sem estar alinhada com o diferencial de qualidade do produto, são incompletas e se destinam ao fim.

A renovação dos padrões de produção objetivando a segurança alimentar de um mercado que busca cada vez mais produtos diferenciados nutricionalmente, somado a necessidade de conter a crescente onda de obesidade da população, ocasionada pelo excessivo consumo de produtos de baixa qualidade, é o antídoto necessário (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2018).

O Brasil, se destacou na categoria “qualidade e segurança dos alimentos” do índice global de segurança alimentar, com pontuação de 88,9, avançando 5% em relação a 2020 (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2021).

Neste sentido a racionalização de insumos agrícolas e seu melhor aproveitamento pelas culturas deve ser amplamente estudado, focando na obtenção de produtos em quantidade e qualidade exigida na atualidade.

Por entendermos que a nutrição de plantas é um forte aliado na obtenção de produtos agrícolas de maior qualidade e menor potencial de perecibilidade, neste capítulo faremos uma abordagem do uso da fertirrigação como técnica promissora na agricultura moderna.

18.2 Premissas da fertirrigação

Para o perfeito entendimento da técnica da fertirrigação é necessário elencar a irrigação como "ator" participante ativo no processo, uma vez que, por definição básica, a fertirrigação pode ser resumida como "*a aplicação de fertilizantes via água de irrigação*". Esta visão simplista ignora muitos outros aspectos que devem ser trazidos a luz da discussão para que evitemos erros grosseiros que possam desacreditar a aplicação da técnica agrícola.

A irrigação é requerida em diversas situações, de forma direta seu uso é atribuído como estratégia para suplementação hídrica em situações de variabilidade temporal e volumétrica de precipitações.

Historicamente os registros de precipitação significativamente abaixo da média, bem como os problemas gerados pela crise hídrica que agrava a produção de alimentos tem forçado os agricultores a aderirem ao uso da irrigação.

Permeando o aumento do uso da irrigação e conseqüentemente de água para esta finalidade, o aumento na demanda fertilizantes requeridos para a produção tem elevado os valores de compra e oscilações na logística de entrega. Em 2019 a quantidade de fertilizante entregue foi em torno de 36,2 milhões de toneladas e as perspectivas são crescentes e estimuladas pela relação de troca de potássio e fósforo com soja que se mostra positiva (12 sacas t⁻¹), em 2021 (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2021).

Em 2020 o setor de fertilizantes cresceu entre 6% e 7% no Brasil, apesar dos desafios impostos pela pandemia da Covid-19 e em janeiro de 2021 já foram negociados 40% do total previsto para o ano (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2021). Este cenário de aumento de demanda e oscilações de câmbio reflete diretamente na composição de preços de vendas de commodities, devido a sua alta correlação com moedas estrangeiras.

A fertirrigação facilita as operações de distribuição de fertilizantes, otimiza a mão de obra e maquinário no dia a dia do agricultor. No entanto, a complexidade desta técnica é muitas vezes negligenciada e de forma simplista muitos a adotam sem critérios técnicos bem definidos e as margens da insubordinação.

A priori, é fundamental que o produtor rural e, ou técnico, tenha em mente que o sucesso do uso da técnica da fertirrigação perfaz algumas prerrogativas. Dessa maneira, são necessários conhecimentos básicos acerca da qualidade da água, diluição do produto, do equipamento utilizado na injeção, dos métodos de aplicação, do tipo e da procedência da fonte de nutrientes utilizada, das características do fertilizante utilizado como da sua compatibilidade, da eficiência do uso dos nutrientes pelas plantas e sua dinâmica no solo, além do monitoramento constante deste processo extremamente dinâmico (Figura 1).

Um conceito equivocado é o de que fertirrigar, resume-se em dividir a recomendação de adubação de sequeiro (sem irrigação) em aplicações sucessivas. A fertirrigação é uma técnica de alta complexidade, principalmente pelo fato de que, em solução, todos os fertilizantes sofrem e causam modificações no processo de fertilização de plantas e solo.

Assim sendo, um dos principais objetivos deste capítulo está na desmistificação da forma simplista, como é encarada a fertirrigação, e deixar claro que não existe uma "receita milagrosa", em que, basta mistura "A + B", diluir em "X" litros de água, injetar utilizando "Y", parcelado em "N" vezes, em cultivos no solo, ou durante "tantas" horas, no caso de sistemas de cultivo sem solo. Também temos a prerrogativa de demonstrar

a viabilidade econômica da fertirrigação por meio de um estudo de caso em uma propriedade rural do noroeste do estado de São Paulo.



Figura 1. Fatores importantes no processo de fertirrigação.

A falta de conhecimento, bem como o uso indiscriminado e sem critérios técnicos, da fertirrigação, tem resultado em insucessos no uso da técnica. Esta situação tem afetado de forma direta os custos de produção, o meio ambiente e a segurança alimentar da população.

No sistema produtivo, o perigo do uso errôneo da fertirrigação está causando problemas ambientais graves, de forma direta, a salinização do solo e a contaminação de águas subterrâneas e indiretamente a indução do estresse hídrico em plantas, mesmo sob irrigação.

Em situações de cultivo em ambiente protegido o descarte de soluções nutritivas é um problema agravado pela ausência de chuvas no interior da casa de vegetação, e o nutriente então não é carregado para as camadas mais profundas do perfil do solo, gerando salinização precoce do solo.

No Brasil os problemas advindos da salinização de solos por ações antrópicas são crescentes e o excesso de fertilizantes, que nada mais é do que "sais" acrescidos ao solo, são os principais agentes.

Como exemplo, uma irrigação de 100 mm com água que possui uma concentração de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de sal, aplica 500 kg de sal em uma área de 1 ha.

O excesso de sais no solo propicia dificuldade de absorção de água pelas plantas, reduz a permeabilidade e a infiltração de água no solo, além de desestruturação por dispersão das argilas (DUARTE *et al.*, 2015).

Em cultivos irrigados, grandes volumes de precipitação lixiviam os sais para as camadas mais profundas podendo contaminar o lençol freático. Um exemplo é o nitrato (NO_3^-) que dissolvido na solução do solo, é facilmente carregado ao longo do perfil do solo, contaminando as águas subterrâneas, diminuindo a eficiência do nutriente, exigindo, aumentos sucessivos na dose recomendada para a cultura, almejando resultados produtivos satisfatórios.

Tendo a certeza de que diversos são os fatores impactantes no uso da fertirrigação fica a pergunta: "Como usar a técnica"?

Para responder essa dúvida faremos uma suscinta abordagem.

Sistema de irrigação utilizado e sua eficiência

Definir o tipo de equipamento de irrigação e equalizá-lo para as características de topografia, quantidade e qualidade de água, disponibilidade de energia, espécie de cultivo, além de facilidade de acesso a peças de reposição, é muito importante.

Um bom projeto hidráulico aliado a escolha de um bom sistema de irrigação permitirá a obtenção de níveis elevados de uniformidade de distribuição de água e eficiência de irrigação.

O gerenciamento deste sistema também é importante e atualmente um dos maiores objetivos da agricultura irrigada.

Se o produtor tiver em mente que: "o sistema de irrigação será o veículo pelo qual o fertilizante será conduzido até atingir seu alvo" o caminho do sucesso já está "meio trilhado".

Sistemas mais eficientes no uso da água permitem a redução da lâmina de irrigação aplicada (bruta), bem como, evitam a contaminação de mananciais hídricos superficiais e subterrâneos.

Uma lâmina líquida de 45 mm quando aplicada por um sistema de aspersão, cuja eficiência mínima deve ser de 85%, gerará uma lâmina bruta de 52,94 mm, por outro lado, se o sistema de irrigação for por gotejamento, com eficiência mínima de 95%, a lâmina bruta será de 47,37 mm. Observe que a $L_{líquida}$ (45 mm) não foi alterada, diferentemente da L_{bruta} , que diferiu 5,57 mm entre os sistemas. É relevante dizer que 5,57 mm representa 55,7 m³ de água por hectare.

Compõem o cálculo de eficiência de aplicação de água às perdas de água que ocorrem durante e depois da irrigação. Normalmente estas são originadas de uso inadequado dos equipamentos, falhas na elaboração e execução de projeto, vazamentos em canalizações, evaporação e arraste da água aplicada.

Em se tratando de sistemas fertirrigados, as perdas após a aplicação de água pelos sistemas de irrigação ganham relevância, já que, escoamento superficial e percolação são os principais agentes contaminantes do ambiente irrigado.

No livro "Irrigação: Princípios e Métodos, de Mantovani et al, (2009) é possível encontrar a forma direta de determinação da eficiência de irrigação, além de outros assuntos de conceituação básica e aplicada.

O fato é que sistemas de irrigação utilizados para fertirrigação, criteriosamente dimensionados e combinados com um adequado sistema de injeção, podem definir o sucesso da técnica.

Assim como no sistema de irrigação, a uniformidade do sistema de injeção deve ser a melhor possível. Neste caso, a uniformidade está diretamente relacionada ao tipo de injetor utilizado e do tempo de avanço da calda na rede hidráulica do sistema de irrigação.

"Tempo de avanço é o tempo considerado para que a calda injetada na fertirrigação alcance o ponto mais distante do setor que se está irrigando, característica essa, exclusiva de cada setor de irrigação".

Em resumo, a injeção de fertilizante só deve ser iniciada com a rede de tubulações plenamente preenchida por água (sistema pressurizado), bem como o tempo de injeção deve ser o mais uniformemente distribuído dentro do número de horas de irrigação do setor a ser fertirrigado.

Na Figura 2, estão demonstrados alguns cenários que elucidam situações comuns no dia a dia de usuários de fertirrigação, considerando um tempo de avanço de

1 hora. No cenário I, observamos que o tempo de injeção é muito menor que o tempo de irrigação. Esta situação gera grande desuniformidade na distribuição da calda fertilizante pois o tempo de injeção é inferior ao tempo que o fertilizante leva para chegar ao último emissor, e o tempo excessivo de irrigação somado ao tempo de lavagem, pode ocasionar a lixiviação dos nutrientes.

No cenário II observamos que, após a fertirrigação, o problema da lixiviação dos nutrientes é amenizado, já que a irrigação é realizada antes da fertirrigação, por outro lado, a desigualdade de tempos é marcante e indesejável, para uma operação que requer alta eficiência na execução.

O cenário III é mais interessante e indicado para fertirrigação em dias chuvosos, onde o sistema de irrigação não é necessário para a reposição de água, atuando como o veículo da distribuição dos nutrientes. Neste caso, pode ocorrer lixiviação, e este é um entrave do uso da fertirrigação, principalmente quando se injeta efluente de agroindústria ou de estações de tratamento de esgoto. Por outro lado, observamos que o tempo de avanço de 1 hora é respeitado e a uniformidade de injeção é alta, devido a distribuição dos tempos dentro da operação de fertirrigação.

No cenário IV, temos uma alta uniformidade de injeção, o tempo de avanço é respeitado, bem como é irrisória possibilidade de lixiviação, uma vez que a irrigação e a injeção são realizadas em pequenas proporções e de forma intercalada, ou seja, pequenas doses e com alta frequência. Este cenário é indicado para períodos secos do ano, e pode ser considerado como o método mais correto agronomicamente.

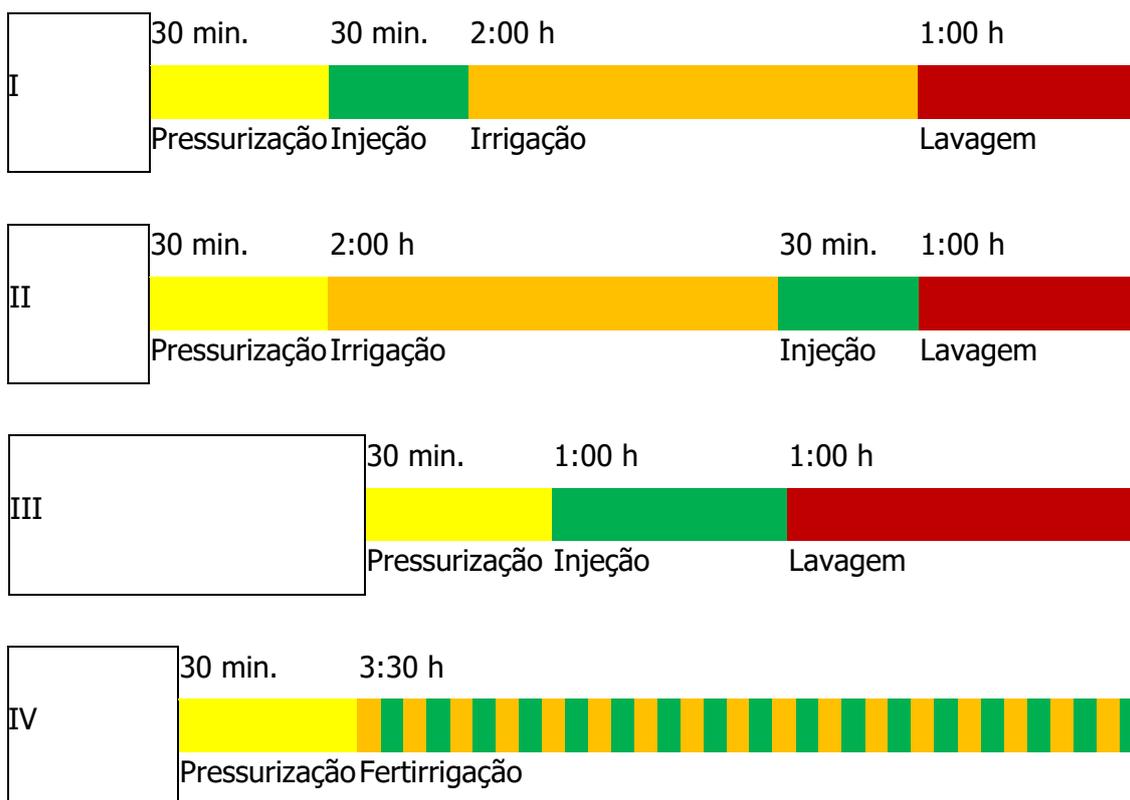


Figura 2. Cenários de fertirrigação, considerando o tempo de avanço de 1 hora, para aplicação de nutrientes em solo.

18.3 Quantidade e qualidade da fonte hídrica

Conhecer o volume de água disponível e obter a outorga de uso são os primeiros passos neste ponto.

Observar a forma de aplicação do sistema de irrigação é outro passo importante, já que, sistemas que molham a parte aérea (comestível) de vegetais exigem a análise de parâmetros microbiológicos da água.

Para fins de fertirrigação a observância deve ser feita de forma mais minuciosa nas características químicas da água utilizada, pois estas podem interferir diretamente na precipitação de fertilizantes e outros químicos injetados, bem como na presença de bactérias redutoras de ferro, que podem causar a oxidação do ferro dissolvido na água, ocasionando o entupimento dos orifícios de saída dos emissores. Lembrando que esta pode variar em função da estação do clima.

A negligência na obtenção de análises de água tem acarretado situações desastrosas no uso da fertirrigação, que dependendo do grau e concentração dos elementos pode tornar-se inapta para uso.

Fortemente ligada a qualidade de água está o perigo de salinização, que pode ser iniciado ou agravado pelo uso de água com alta concentração de sais, devendo-se evitar o uso de água com condutividade elétrica (CE) superior a $2,25 \text{ dS m}^{-1}$ (classe C_2 – salinidade média) (MANTOVANI *et al.*, 2009).

18.4 Sistema de injeção de fertilizantes

Vários são os sistemas disponíveis para injeção de fertilizantes. Cada qual com sua particularidade são adotados como “melhores”, no entanto, aqui faremos uma abordagem dos mais utilizados e que se enquadram como “eficientes” do ponto de vista de operacionalidade.

A escolha do tipo de injetor deverá ser feita com suporte técnico e levantamento prévio dos recursos disponíveis e prontamente aportáveis. É fundamental definir a finalidade de uso, disponibilidade de investimento e nível técnico do operador da irrigação.

Independente do sistema a ser utilizado a instalação física que abrigará a unidade de injeção deve ser construída de forma a proteger os equipamentos, os operadores, e se possível, acondicionar os fertilizantes que serão utilizados nas operações. Em alguns casos a estrutura pode servir de depósito e para tanto, necessita de plataforma de recebimento de sacarias guinchos para descarga de bags (1 ton). A proximidade entre os fertilizantes e a unidade de injeção diminui o tempo de operação, facilita o trabalho e evita o desperdício de produtos durante o transporte.

A unidade de injeção deverá abrigar dois reservatórios plásticos, de volume compatível com a solubilização da quantidade de fertilizante a ser trabalhada. A interligação entre o reservatório deve ser manejada por meio de um registro plástico de fecho rápido (esfera), para controle da circulação da calda. É importante uma tubulação de saída de fundo para limpeza de impurezas decantadas nos dois tanques.

Do reservatório 1 para o reservatório 2 deve ser feita uma pré filtragem da calda. O reservatório dois deve ser interligado ao sistema de injeção adotado (Figura 3).

A dissolução dos fertilizantes é um dos pontos mais importantes no sistema de injeção. Esta pode ser feita manualmente ou com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 4). O agitador mecânico pode ser feito com motor elétrico de baixa rotação interligado a um redutor de polias e uma hélice para agitação da calda. Sugere-se que o conjunto de agitação da calda seja de plástico, alumínio e se possível aço inoxidável.



Figura 3. Disposição das caixas de diluição (A) e injeção (B) em sistema de fertirrigação (ANDRADE, 2010).



Figura 4. Agitadores, mecânico e manual, de fertilizantes (A) Drumond (2010), e (B) Palaretti (2009).

Na sequência abordaremos de forma direta alguns dos principais equipamentos e formas de injeção. Salientamos que existem outros, aqui não referenciados.

18.5 Injeção direta na sucção da bomba

Este sistema é um dos mais antigos e caracteriza-se pela sucção simultânea da calda e da água de irrigação, pela motobomba de pressurização do sistema de irrigação (Figura 5).

A uniformidade de fertirrigação é baixa, uma vez que, a injeção é feita por meio do princípio físico da sucção diferencial, no qual, na medida em que ocorre a diminuição da coluna de líquido do reservatório de calda, cairá a taxa de sucção. Portanto, oscilações de pressão no sistema acarretará a dinâmica de injeção da calda.



Figura 5. Injeção de fertilizantes diretamente na tubulação de sucção de motobomba utilizada na pressurização de sistemas de irrigação.

A regulagem de injeção é via válvula de gaveta instalada na interligação da caixa de injeção e a tubulação de sucção da motobombas de irrigação.

A injeção é rápida, de fácil manutenção e não exige mão de obra tecnicada para realização da operação, além de baixo valor de investimento.

Os inconvenientes se resumem ao desgaste prematuro do sistema de bombeamento de irrigação, pela ação corrosiva e abrasiva dos fertilizantes e potencialidade de poluir a fonte hídrica em caso de retorno ou rompimento de tubulações.

Este sistema deve ser evitado, já que, outras possibilidades de injeção são mais eficientes e de menor risco.

18.6 Injeção feita por tanques de diferencial de pressão

O atrativo deste sistema é não utilizar energia elétrica para injeção, ser de fácil operação e muito prático. É constituído por um tanque cilíndrico, de 20 a 500 litros dentro do qual são depositados os fertilizantes sólidos.

O tanque é hermeticamente fechado e conectado por mangueiras ($\pm 1''$) à tubulação adutora do sistema de irrigação, em "by pass". A água que circula, vinda da parte inferior do tanque, dilui os fertilizantes que são injetados a rede hidráulica de irrigação, pela parte superior do tanque (Figura 6).



Figura 6. Tanque de injeção de fertilizantes.

A vazão de injeção é controlada por válvulas ou registros, que criam um diferencial de pressão de até $0,5 \text{ kgf cm}^{-2}$ (5 mca), variando de 10 a 500 L h^{-1} , exigindo que as paredes do equipamento suportem a pressão interna.

Podem ser consideradas limitações deste injetor: a desuniformidade de injeção, uma vez que no início do processo a concentração de nutrientes na calda é maior, diminuindo ao longo do tempo; a taxa de injeção variável e a dificuldade no controle de dosagem, uma vez que, o tanque, por ser fechado, não permite a verificação visual do fim da injeção, exigindo monitoramento constante da CE de injeção, para finalização do processo.

18.7 Injeção por venturi

O venturi é um equipamento plástico contendo uma constricção entre uma seção convergente (entrada) e outra divergente (saída). Esta redução no diâmetro do conduto gera um aumento da velocidade provocando uma subpressão que succiona a calda fertilizante para o interior da tubulação (Figura 7).

A instalação do equipamento pode ser feita diretamente na tubulação de adução do sistema de irrigação ou paralela, em "by pass", sendo essa mais recomendada.

A inserção deste equipamento na tubulação gera perda de carga, que pode chegar a 20% da altura manométrica (pressão total do sistema), portanto, sua instalação deve ser estudada previamente.



Figura 7. Sistema de fertirrigação utilizando injetor venturi (A) Bastos (2008), e (B) NaanDan Jain (2021).

Usualmente, os problemas constatados no funcionamento do venturi, advém de erros na instalação e operação do equipamento. Destaca-se a falta de sucção, danos na esfera de vedação, mangueiras e pressurização do equipamento.

O venturi apresenta boa eficiência de injeção, mantendo a concentração de fertilizante praticamente constante ao longo tempo de aplicação. O custo médio do equipamento varia de R\$ 150,00 (modelo de 3/4") a R\$ 350,00 (modelo de 2"), e pode ser instalado isolado ou em conjunto (paralelo) a outros equipamentos.

A simplicidade confere a este equipamento amplo uso na injeção de fertilizantes em sistemas irrigados de pequeno a médio porte, principalmente por não exigir mão de obra especializada e apresentar limitações de automatização.

É conveniente realizar uma calibração do venturi, para que se obtenha uniformidade na injeção, respeitando o tempo da frente de avanço, posto que a vazão de injeção varia de 10 a 2000 L h⁻¹.

Uma desvantagem no uso do venturi está na possibilidade de entupimento dele, com o uso de caldas de baixa qualidade (muito sólido em suspensão), uma vez que, o mesmo tem em sua constituição placa de orifício, de diâmetro milimétrico.

Como forma compensatória da perda de carga gerada pelo venturi, é comum a instalação, antes do equipamento, de uma bomba auxiliar de pressão suplementar ("booster"), com função de pressurizar o equipamento, possibilitando a sucção da calda fertilizante, por aumentar o diferencial de pressão. Este procedimento é interessante, para isolar o sistema de injeção do de irrigação.

18.8 Injeção via bomba centrífuga

É um sistema pressurizado de injeção de fertilizantes diretamente na tubulação de recalque do sistema de irrigação (Figura 8).

A grande vantagem deste tipo de injeção está na ausência de perda de carga, gerada pelo equipamento injetor, por outro lado a pressão de injeção deve ser superior àquela aferida na rede adutora.

Normalmente as bombas injetoras desta categoria são monobloco e multiestágio, confeccionadas em aço inoxidável, e com potência inferior a 3 cv e requerem acionamento elétrico.



Figura 8. Sistema de fertirrigação utilizando bomba injetora de aço inoxidável (A) Palaretti (2009), e (B) NaanDan Jain (2021).

É possível a utilização de qualquer bomba centrífuga, embora, aquelas cujo constituinte do corpo (carcaça e caracol) é de ferro fundido, irão sofrer a ação corrosiva dos fertilizantes injetados, e terão a vida útil reduzida.

A bomba centrífuga tem taxa de injeção variável e, portanto, deve ser calibrada no local, em função do tempo de avanço considerado.

Mesmo a bomba injetora sendo de aço inoxidável é pertinente avaliar os efeitos e particularidades de cada fertilizante a ser utilizado, desde sua solubilidade até seu potencial corrosivo. Este assunto será tratado oportunamente.

18.9 Injeção via bomba injetora

Nesta categoria estão as bombas de deslocamento positivo. Destacam-se as bombas de pistão, diafragma e mistas (pistão/diafragma). As bombas de engrenagens, peristálticas e rotativas excêntricas, não são muito comuns em sistemas de injeção de fertilizantes atualmente.

(i) Injetora de diafragma

O injetor por diafragma é um equipamento simples, portátil e leve. Caracteriza-se pela sucção/injeção controlada pelo deslocamento de uma membrana de borracha e uma mola (Figura 9). A vazão de injeção é extremamente dependente da vazão e da pressão da linha de recalque do sistema de irrigação e varia de 50 L h^{-1} a 600 L h^{-1} .

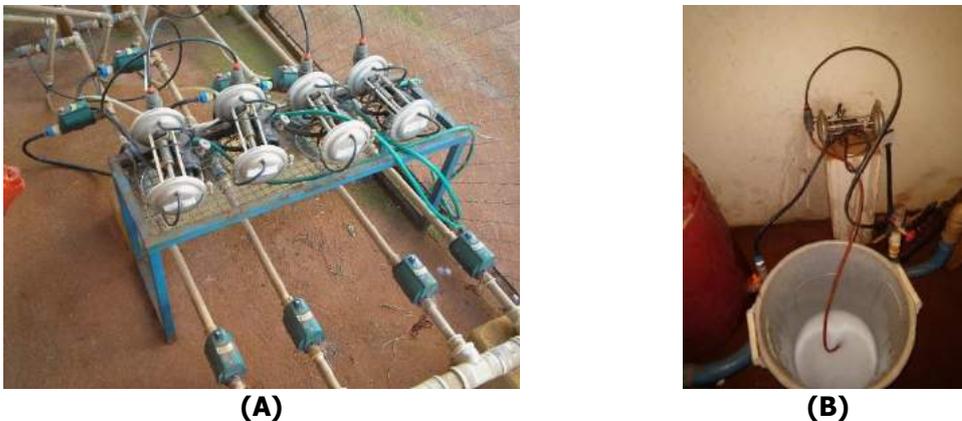


Figura 9. Bomba injetora tipo diafragma.

O equipamento custa de R\$ 2.000,00 a R\$ 4.000,00, em função da vazão de injeção dele.

Sua instalação é feita em *by pass* à tubulação de recalque do sistema de irrigação e o ponto de sucção é ligado ao reservatório de injeção.

Os maiores inconvenientes deste equipamento são a faixa restrita de pressão de trabalho, até 65 mca, e o desperdício de água, já que para cada litro injetado ocorre o descarte de outro litro para o ambiente. Somam-se a isto a manutenção difícil e cara.

(ii) Injetora de pistão cerâmico

O funcionamento do injetor de pistão (bomba) é idêntico ao observado em motores de dois tempos. A calda é succionada para o interior da câmara de injeção por meio do deslocamento do pistão no interior de um cilindro, e injetada, quando o pistão é comprimido. Todo o movimento é sincronizado e controlado por válvulas de fechamento mecânico, de admissão e expulsão. Este tipo de equipamento também é utilizado em pressurização de lava autos, pulverizadores e atomizadores (Figura 10).



Figura 10. Sistema de fertirrigação utilizando bomba injetora de pistão (BASTOS, 2009).

Este tipo de injetor tem alto custo, cerca de R\$ 3.000,00 a R\$ 7.000,00, em função da dimensão do equipamento. A vazão da solução é descontínua e varia de 30 a 3.000 L h⁻¹, embora o equipamento apresente alta precisão de injeção.

O acionamento é feito por energia elétrica, embora algumas versões possam ser acionadas sem uso de eletricidade.

Um atrativo deste tipo de injetora é ser totalmente proporcional à frequência trabalhada no motor elétrico, sendo assim ideal para uso com sistemas precisos de automação de injeção, com controle automático de CE e retroalimentação por sensores para ajuste do sistema.

18.10 Injetora de motor hidráulico – Bombas dosadoras

Também conhecidas como hidromotoras, estas bombas dosadoras são muito versáteis, eficientes e precisas. Tem preço médio de R\$ 1.500,00, baixo custo de manutenção (6% do valor de aquisição, por ano) e quando comparadas com outros injetores não elétricos, apresentam perda de carga média de 10 mca (Figura 11).

Uma particularidade atrativa deste tipo de dosador é a manutenção da taxa de injeção da calda fertilizante durante o tempo, mesmo sob variações de pressão na rede de irrigação, daí vem o nome desta injetora de "proporcional".

Existem inúmeras possibilidades de instalação deste tipo de equipamento, isto é: diretamente na tubulação de adução da irrigação; em linha de tubulação paralela (*by pass*); isoladas ou em paralelo. Entretanto, quando utilizados em paralelo estes injetores preconizam a aplicação isolada dos nutrientes, em que, não é feita a mistura de vários produtos.

O princípio de funcionamento é bem simples, a própria água (fluido motor) ao passar no interior do injetor gera uma força motriz que acionando um embolo dosador que aspira a calda a ser injetada. A solução uma vez dentro do equipamento é misturada com a água e segue para a aplicação no sistema de irrigação. O movimento do embolo dosador é semelhante ao que ocorre nas bombas de pistão, quer dizer, ciclos de admissão e expulsão da calda. Na mangueira de sucção há uma válvula de retenção que impede que a calda e mesmo água limpa retornem para a caixa de calda fertilizante. Como há uma perda de carga para geração de força motriz, faz-se necessário um correto dimensionamento, adicionando pressão extra no sistema ou calculando-se bomba "booster" para suplementar a pressão necessária para seu correto funcionamento.

Os injetores deste tipo são confeccionados em polímeros, PVDF, polietileno reforçado com fibra de vidro, e etc. Existe disponível no mercado uma gama de produtos com este princípio, e em todos a manutenção é fácil e normalmente restringe-se a substituição de anéis de vedação de borracha desgastados.



(A)



(B)

Figura 11. Injeção de fertilizantes com bomba dosadora (MARCELO BASTOS, 2009).

Na aquisição do equipamento é importante informar ao fabricante quais as características dos produtos que serão injetados, contribuindo dessa forma, para que o dimensionamento dos materiais constituintes do injetor possa proporcionar maior vida útil ao mesmo.

Como informação, lembrando que estas irão variar em função do fabricante e modelo, o injetor hidráulico trabalha com pressões de 0,3 a 8 kgf cm⁻²; para 0,25 m³ h⁻¹ a 25 m³ h⁻¹ de vazão motriz e injetando de 0,0075 L h⁻¹ a 1.375 L h⁻¹.

18.11 Injetora multicanais

São equipamentos robustos e de alto custo, entretanto, alta precisão. Trata-se de unidades de injeção com foco em grandes áreas (Figura 12).

As injetoras multicanais, também chamadas "mesas de fertirrigação" são comandadas por controladores de irrigação, contendo sensores de alimentação de dados ou não. Tais equipamentos podem ser acionados pela pressão da rede, com uma tomada de vazão a jusante da motobomba principal e com injeção de fertilizante na

sucção desta; também pode trabalhar com bomba “booster” e ficar instalada totalmente a jusante da motobomba principal.

O grande atrativo desta injetora é trabalhar com vários tipos de caldas fertilizantes com taxas de injeção diferentes em momentos de injeção também diferentes. A flexibilidade para o manejo perfeito pode ser conseguida com esse equipamento.

Também se pode injetar ácido e soluções cloradas para ajuste de pH e limpeza de sistemas de irrigação, respectivamente.



(A)



(B)

Figura 12. Sistema de fertirrigação utilizando injetoras multicanaís (NAANDAN JAIN, 2021).

A injetora consiste em um controlador, uma motobomba (opcional) tubulação de entrada e saída, uma válvula para regulagem de pressão na saída, e os canais. Cada canal é composto de uma válvula solenoide de alta ciclagem, um Venturi, e um rotâmetro ajustável. Assim, se pode regular pela ciclagem da válvula solenoide e pela vazão do rotâmetro (equipamento que indica com boa precisão a vazão passante). Cada canal pode injetar de 300 litros por hora até 1.000 litros por hora.

Devido as características de automação e precisão deste tipo de injetora seu valor de mercado, dependendo do modelo, gira em torno de R\$ 40.000,00, além de exigir mão de obra bastante capacitada para operar e entender o processo da fertirrigação.

18.12 Considerações sobre o uso de fertilizantes em sistemas fertirrigados

A fonte de fertilizante para uso na fertirrigação deve ter como características a alta solubilidade, baixo risco de incompatibilidade química, custo acessível, facilidade de manuseio, pureza e fornecer outros nutrientes simultaneamente.

O uso de fertilizantes líquidos, que apresentam alta solubilidade tem se propagado, sob entrave de elevado custo e dificuldades de armazenamento na propriedade.

É indicado que se evite as formulações prontas, chamadas popularmente de “canela seca” por exemplo, 04-14-08; 20-05-20, em virtude do alto grau de impureza e da baixa solubilidade.

Quanto maior a solubilidade melhor e menos custosa será a diluição do fertilizante e esta característica varia muito entre as fontes disponíveis. Via de regra a solubilidade sofre ação direta da temperatura da água de diluição e na literatura existem várias tabelas que condessam essas informações.

Os fertilizantes fosfatados convencionais raramente são aplicados via fertirrigação por serem de baixa solubilidade, bem como pela alta probabilidade de precipitação na forma de fosfato de cálcio, na presença de águas com alta concentração de cálcio. A formação do precipitado diminui a eficiência da fertirrigação e pode entupir os emissores como incrustar nas paredes da tubulação e no interior do injetor.

Já os fertilizantes fosfatados para fertirrigação, com alta pureza e alguns inclusive com pH tampão abaixo de 7,0 são utilizados na fertirrigação, de forma profissional, consciente e com ótimos resultados.

Os fertilizantes nitrogenados são os mais solúveis, principalmente as formas nítricas, e são amplamente utilizados na fertirrigação.

A solubilidade das fontes potássicas também favorece a aplicação via fertirrigação. O cloreto de potássio (KCl) branco é preferido, por ser mais solúvel e não possuir ferro em sua composição, embora, deve-se atentar para a toxicidade gerada nas plantas pelo alumínio (Al) presente na fonte.

O KCl vermelho é pouco indicado, já que no momento da diluição, forma uma "borra espumosa", de dissolução dificultosa, além de possuir concentrações de ferro que podem precipitar e obstruir tubulações e emissores.

Os micronutrientes também têm seu grau de solubilidade, geralmente são muito solúveis, exceto aqueles de fonte ferrosa. Uma dica para a injeção de fertilizantes é a diluição dos mesmos à parte, da caixa de diluição dos macronutrientes, e posterior adição no sistema de injeção. Isto evita a formação de precipitados e desuniformidade na diluição.

Em fertirrigação à prioridade é o uso de fertilizantes com baixo índice salino e baixa condutividade elétrica (CE), principalmente em situações em que seja propícia a salinização do ambiente de cultivo. A atenção deve ser redobrada quando a CE da água de diluição/irrigação for superior à $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, já que neste caso, a água por si só já apresenta riscos moderados à salinização do solo.

Outro ponto importante que deve ser levado em conta é o poder de reação residual dos fertilizantes sobre o pH do solo e da água de irrigação, indicado pelos índices de acidez e alcalinidade. Para os fertilizantes de reação ácida há necessidade de se adicionar calcário (CaCO_3) para correção da acidez, na reação alcalina, considera-se a quantidade de CaCO_3 adicionada pela aplicação do fertilizante.

Alguns fertilizantes, quando misturados reagem e formam precipitados que reduzem a eficiência da fertirrigação, causam aumento de custos, o entupimento de emissores e a redução no diâmetro das tubulações, bem como poluem o ambiente. Este processo é dinâmico e ocorre devido a incompatibilidade de fertilizantes e produtos, em condições normais de pH, concentração e temperatura.

Na mistura de fertilizantes pode ocorrer a compatibilidade total, na qual, não se observa nenhuma reação na mistura dos fertilizantes, bem como alteração em suas características intrínsecas; a compatibilidade parcial, em que, a mistura deve ser feita momentos antes de injetada (tanque de diluição) e incompatibilidade total, quando, a mistura de fertilizantes não pode ser feita em hipóteses alguma.

Geralmente produtos à base de cálcio, sulfato, fósforo e enxofre precisam de maior atenção, por causa da formação de precipitados, na forma de fosfatos e sulfatos insolúveis, quando misturados a outros produtos e, ou compostos.

As fontes de fósforo também merecem atenção, devido a incompatibilidade com a ureia, por ser esta, um dos fertilizantes mais utilizados na fertirrigação, como fonte de nitrogênio.

É indicado que, em caso de dúvida ou compatibilidade condicionada entre produtos a serem injetados no sistema de irrigação, que seja feita a mistura previamente, pelo menos um dia antes, e se faça a verificação visual da formação de precipitados.

A corrosão causada nos equipamentos de irrigação e injeção variam em função do fertilizante utilizado. Embora o uso de materiais plásticos seja desejável, em várias situações e componentes, o uso de materiais metálicos é comum.

Os materiais plásticos são menos "atacados" pelos fertilizantes. No entanto, limitações de pressão ($<16 \text{ kgf cm}^{-2}$) e sensibilidade à abrasão, impedem que num projeto de irrigação todos os componentes se restrinjam a este material.

É preciso entender que, a filtragem do sistema de fertirrigação tem que ser tão eficiente quanto aquela instalada no sistema de irrigação, atuando principalmente na retenção de partículas sólidas, evitando seu arraste ao longo da tubulação.

18.13 Rotina básica no sistema operacional de fertirrigação

Não existe uma receita para manejar os sistemas de injeção. Todavia, é indispensável seguir algumas recomendações, que permitiram reduzir as possibilidades de erros.

Antes da injeção, pressupondo que já foram cumpridos os passos de escolha da fonte de fertilizante mais adequada àquela situação, solubilidade, compatibilidade, etc, deve-se preparar o sistema de irrigação, e isto significa posicionar emissores, equipamentos (pivô central/autopropelido), setores de irrigação localizada (controlador/manual). Respeitando a frente de avanço e o tempo de injeção adequado, deve-se checar a pressão de funcionamento do sistema.

Um detalhe importante é aferir a temperatura da água, de forma simples, utilizando um termômetro digital ($\cong \text{R\$ } 35,00$). A temperatura deve estar próxima dos 20°C . Para efeitos de solubilidade, se a temperatura estiver abaixo deste valor, é pertinente diminuir a quantidade de fertilizante indicada nas tabelas e se houver tempo hábil, realizar um teste de diluição à parte.

Alguns fertilizantes necessitam de água mais quente para solubilizar, por exemplo, o bórax. Neste caso, na prática, pode-se deixar a água dentro da caixa de diluição, para que seja aquecida pelo sol.

Feito isso, procede-se a diluição dos fertilizantes, obedecendo a ordem de solubilidade, ou seja, do menos para o mais solúvel, na caixa de diluição. Lembrando que os fertilizantes que contiverem ou forem fonte de ferro devem ser evitados na fertirrigação, ou devem ser diluídos antes de serem adicionados à calda que será injetada.

A calda, após a diluição, deve ficar em repouso por no mínimo 30 minutos, para possibilitar decantação de partículas em suspensão, sejam elas de que natureza for.

Em seguida, abre-se o registro de interligação das caixas, permitindo o deslocamento da calda para a caixa de injeção, evitando-se a passagem de decantados

e sobrenadantes, por meio da filtragem simples entre as caixas. Neste momento aciona-se o sistema de injeção.

Durante não há necessidade de agitação da calda, uma vez que, a calda estando na caixa de injeção, pode ficar lá em repouso, pois não há mais nada a decantar nem sobrenadar, por ser esta, uma solução salina pura, ou seja, sem saturação e sem gradiente de concentração. Este cuidado é importante pois evita que materiais sólidos, decantados no fundo, entrem em suspensão e sejam sugados pelo injetor.

O processo de injeção deve ser acompanhado de perto, verificando anormalidades e principalmente observando quaisquer alterações na pressão e vazão do sistema.

A injeção deve ser interrompida sempre que toda calda for aplicada. Ao término da injeção devem-se fechar os registros da bomba injetora e desligamento dela.

Depois da injeção deve-se lavar todo o conjunto de injeção, incluindo as caixas de diluição e injeção, com água limpa e corrente. Esta água pode ser a mesma que irá ser utilizada para lavagem do sistema de irrigação, após o término da injeção. O tempo de lavagem é relativo e deve ser o mais minucioso possível.

Recomenda-se não deixar acumular no fundo das caixas materiais decantados. Muitas vezes será necessária uma raspagem de detritos no fundo das caixas, é indicado utilizar neste procedimento, ferramentas de plástico ou borracha, com pontas e cantos "cegos".

Sempre que possível a fertirrigação deve ser feita nas horas menos quentes do dia, e conforme visto anteriormente, da forma mais parcelada possível. É evidente que no dia a dia do sistema produtivo, muitas das vezes, é improvável que isto ocorra, por outro lado, deve-se pensar na eficiência da fertirrigação, nos custos envolvidos e na facilidade do procedimento.

18.14 Manejo da fertirrigação via extrator de solução

Fertirrigar de forma eficiente significa ofertar, nutrientes e água, em quantidade suficiente e no momento certo, de forma a reduzir a competição entre plantas. Como discutido até aqui, a diversidade de produtos, equipamentos e conceitos é imensa, por outro lado, de nada adianta a aplicação e uso destes, sem atualizações constantes na forma de manejá-los.

A eficiência no uso de fertilizantes pelas plantas perpassa pelo monitoramento de sua concentração na solução do solo. Assim sendo, a coleta de solução nutritiva do solo é uma forma rápida e direta de se evidenciar os efeitos e o comportamento dos nutrientes no solo.

A coleta da solução de solo é feita por meio de extratores de solução de solo (ESS). Compõe o ESS, um tubo de PVC – linha soldável ou de esgoto com diâmetro de 3/4", com uma capsula de cerâmica porosa, similar a de um tensiômetro, instalada em sua extremidade inferior, enquanto a superior é vedada por uma rolha de borracha e, ou um cap de PVC roscável (Figura 13A).

Após a instalação o ESS é vedado e mediante a sucção aplicada em seu interior a solução do solo entra por meio da cápsula porosa e ali fica retida para posterior retirada com uma seringa pela parte superior.

O vácuo interno do ESS é feito com uma seringa de 60 ml com bico roscável associada a um registro de 3 vias, conectados no microtubo que percorre todo o ESS até próximo a capsula porosa.

O registro de 3 vias fica conectado ao microtubo permanentemente e quando há necessidade de aplicação do vácuo ou a coleta da solução do solo, conecta-se o registro na seringa (Figura 13B). O manejo do registro é simples, numa via aplica-se o vácuo e em outra se expelle o ar do interior da seringa, esvaziando-a. O movimento de sucção e esvaziamento da seringa deve ser repetido pelo menos quatro vezes consecutivas para que seja gerado vácuo de aproximadamente -60 a -70 kPa, suficiente para a entrada da solução do solo no ESS.

Para aplicação do vácuo podemos utilizar uma pistola de vácuo (Figura 13C). A grande vantagem é a operacionalidade, quando se tem inúmeros ESS, bem como os mesmos amostram maiores profundidades do solo. Em lojas de ferramentaria este equipamento é comercializado por aproximadamente R\$ 500,00, com a finalidade de fazer vácuo em motores à diesel.

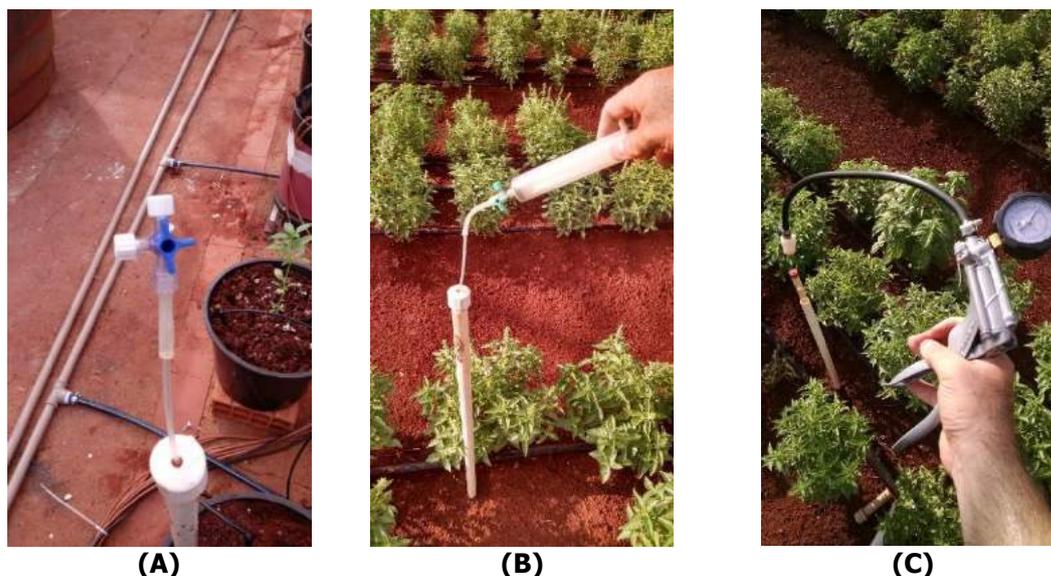


Figura 13. Detalhe do registro de 3 vias conectado ao microtubo (A); Aplicação de vácuo com seringa associada a registro de 3 vias (B) e com uso de pistola de vácuo (C).

A coleta da solução do solo é deve ser feita com frequência e quando a umidade do solo está próxima a capacidade de campo. Após uma chuva ou irrigação deve-se esperar por cerca de 1 hora e aplicar o vácuo, aguardando pelo menos 12 horas para a retirada da amostra de solução do solo.

Da solução coletada pode-se determinar a condutividade elétrica (EC), o pH e as concentrações de nutrientes. As concentrações podem ser obtidas em laboratório, a um custo de R\$ 10,00/amostra ou com o uso de kits rápidos, que em sua maioria utilizam fitas colorimétricas, e de resultado instantâneo.

É indicativo de fertirrigação em conformidade quando a diferença entre os pontos amostrados ao longo do perfil não ultrapassar $0,5 \text{ dS m}^{-1}$. Valores crescentes de EC indicam ocorrência de percolação profunda e lixiviação de sais. Em casos assim, medidas corretivas, como a diminuição da lâmina de irrigação e, ou diminuição na dose de nutrientes aplicada por vez, pode amenizar o problema.

18.15 Custos operacionais: adubação manual x fertirrigação

Para facilitar o entendimento deste item é importante caracterizarmos a situação em que estamos discutindo os custos comparativos. O cenário a ser apresentado é de pomares de citros da região Norte do estado de São Paulo. A empresa responsável pela coleta e análise das informações é a Stocler Engenharia e Consultoria Ltda.

Partimos do pressuposto que o produtor já tenha atendido a todos os requisitos básicos de eficiência do sistema de irrigação; escolha do fertilizante mais adequado; perfeito entendimento da "marcha de absorção" dos nutrientes pela cultura e injetores indicados para sua especificidade, tendo a seguinte caracterização: (i) árvores adultas de citros: 82.500 plantas, (ii) área:162,20 hectares, (iii) sistema de irrigação: Gotejamento superficial – 1 Linha por planta - 3 setores, (iv) vazão: 325 m³/hora, (v) Bomba de injeção dos fertilizantes: 2% - 6.500 L h⁻¹, (vi) potência instalada: 287 kW - 1,76 kW ha⁻¹, (vii) custo energético: R\$ 0,27 kw/hora (dia); R\$ 0,08 kw/hora (noite), (viii) recomendação de adubação: Nitrogênio: 150 kg/hectare e Potássio: 160 kg ha⁻¹, (ix) Fontes Utilizadas:

Nitrato de Cálcio: 15,5% N e 19% Ca

Nitrato de Amônio: 32% N

Cloreto de Potássio: 58% k₂O

(x) dinâmica de parcelamento adotado pela Fazenda

Período obrigatório de uso da irrigação

Agosto:

5 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 5 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 20 kg ha⁻¹ KCl

Setembro:

20 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 20 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 50 kg ha⁻¹ KCl

Outubro:

15 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 15 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 15 kg ha⁻¹ KCl

Novembro:

10 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 10 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio

Período sem necessidade de irrigação

Fevereiro:

7,5 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 7,5 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 20 kg ha⁻¹ KCl

Março:

10 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 10 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 25 kg ha⁻¹ KCl

Abril:

7,5 kg ha⁻¹ de Nitrato de Cálcio + 7,5 kg ha⁻¹ Nitrato de Amônio + 30 kg ha⁻¹ KCl

(xi) Caracterização da irrigação e fertirrigação:

Nesta região noroeste do estado de São Paulo a indução do florescimento em citros se dá pelo *deficit* hídrico acumulado nos meses de abril a julho. A partir de agosto o sistema de irrigação é ligado para quebra do estresse hídrico e indução do florescimento. A irrigação perdura até o início de novembro, quando a temporada de chuvas se inicia.

A irrigação é interrompida de novembro a abril, já que o regime pluviométrico da região é suficiente para a dotação hídrica do pomar.

A adubação do pomar é feita de agosto à outubro, interrompida de novembro a janeiro, e retomada de fevereiro a abril.

Dentro desta dinâmica de reposição de água e fertilizantes, podemos perceber que a fertirrigação é utilizada nos meses em que se está irrigando (agosto-outubro). Por outro lado, para que a recomendação de adubação possa ser completa, há necessidade de ligar o sistema de irrigação também no período de chuvas (fevereiro-abril) (Figura 14).

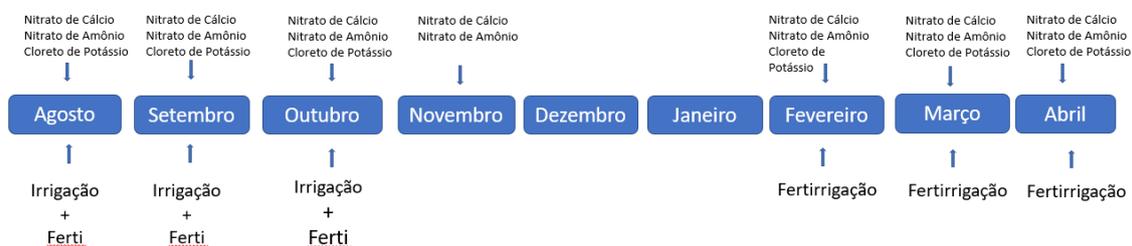


Figura 14. Resumo da dinâmica de irrigação e fertirrigação na cultura de citros no noroeste do estado de São Paulo, Brasil (Stocler Engenharia e Consultoria Ltda).

Considerando a estratégia exclusiva de uso da fertirrigação para aplicação dos fertilizantes, podemos avaliar cenários distintos (Figura 15).

Quando utilizamos o sistema de irrigação durante o dia, nos referidos períodos indicados acima, exclusivamente para fertirrigar (cenário I) o custo operacional por hectare é 59% superior ao de irrigar e fertirrigar (cenário III). Caso as operações sejam realizadas à noite, este custo comparativo é de 56% a mais para o cenário II em relação ao IV.

Esse comportamento pode ser atribuído ao maior custo energético no período de fevereiro à abril, quando a demanda contratada é utilizada somente para fertirrigação, já que neste período a reposição hídrica é feita pelas chuvas (cenário I)

Caso optemos pela aplicação de fertilizantes durante a noite o custo de realizar a irrigação e a fertirrigação (cenário IV) é 64% inferior quando se utiliza somente a irrigação (cenário II).

É importante frisar que mão de obra operacional pode sofrer alterações devido à eventual necessidade de adicional noturno, superando os R\$ 5.211,59 adotado neste estudo.

Tabela 1. Caso (I. irrigar só para fertirrigar durante o dia, II. irrigar só para fertirrigar durante a noite, III. irrigar e fertirrigar durante o dia, e IV. irrigar e fertirrigar durante a noite), tempo diário (t, h), custo energético (Ce, R\$), demanda (CPFL) (D, R\$), valor da mão-de-obra (vMO, R\$), custo total (Ct, R\$) e custo unitário (Co, R\$ ha⁻¹) referentes aos cenários de avaliação de custos da fertirrigação de citros no noroeste do estado de SP, Brasil (Stocler Engenharia e Consultoria Ltda).

Caso	t	Ce ¹	D	vMO ²	Ct	Co
I	310,21	24.038,46	21.154,77	5.211,59	50.404,82	310,76
II	310,21	7.211,54	21.154,77	5.211,59	33.577,90	207,02
III	310,21	14.258,82	12.088,44	5.211,59	31.558,86	194,57
IV	310,21	4.277,65	12.088,44	5.211,59	21.577,68	133,03

¹ Ce = Pt(kW).Pr(R\$ kW h⁻¹).t(h). ² vMO: 2.t(h).Cm(R\$ h⁻¹).

Após análise destes custos fica evidente que os custos operacionais são muito superiores quando ligamos o sistema de irrigação somente com o objetivo de fertirrigar nos períodos de chuva.

Quando consideramos a APLICAÇÃO CONVENCIONAL DE FERTILIZANTES, realizada por distribuidores de adubo à lanço, não é operacional dividir semanalmente a quantidade total recomendada de fertilizantes, como é feita na fertirrigação. Assim, para efeito de discussão consideraremos o parcelamento da adubação total em três períodos (Figura 15).



Figura 15. Resumo da dinâmica adubação convencional na cultura de citros no noroeste do estado de São Paulo, Brasil (Stocler Engenharia e Consultoria Ltda).

Considerando a estratégia de distribuição de fertilizantes adotada acima, podemos compor o custo operacional e observar que ele é inferior aos cenários I a III (fertirrigação), ficando 45% superior ao cenário IV (irrigação + Fertirrigação noturno) (Tabela 2).

Tabela 2. Custo operacional de adubação convencional na cultura de citros no noroeste do estado de São Paulo, Brasil (AGRIANUAL, 2018).

Descrição	Equipamento	Custo da Hora máquina	Tempo da operação	Custo Total	Custo por Hectare
Adubação (3x)	HM TP 4x4 85 CV + Adubador à lanço (1550 Kg)	R\$ 107,71	1,8 h	R\$ 31.447,01	R\$ 193,87

É importante salientar que esta discussão está restrita aos custos operacionais, não sendo levado em conta os benefícios da fertirrigação e as respostas da planta frente a este sistema de fornecimento de nutrientes.

Em resumo, podemos verificar que, para as condições caracterizadas acima, irrigar e fertirrigar nos meses de agosto, setembro, outubro, assim com fertirrigar nos meses de fevereiro, março e abril tem praticamente o mesmo custo operacional por hectare que a adubação convencional.

Este tipo de análise pode ajudar o produtor a encontrar o ponto de equilíbrio econômico e reduzir custos em seu processo.

18.16 Considerações finais

Dentro do tema proposto no capítulo buscamos delinear um panorama geral da fertirrigação, em suas mais variadas nuances, e finalizar com uma análise que muitas vezes nos leva a pensar nos reais benefícios da migração de um sistema convencional de adubação para a fertirrigação. O desfecho permite que o produtor trace estratégias

que definam a melhor forma de conduzir sua lavoura, não necessariamente optando por um ou outro sistema, mas talvez um híbrido destes.

A fertirrigação potencializa a utilização dos sistemas de irrigação, e o aumento de mão de obra adicional na irrigação quando se realiza a fertirrigação não é significativa, entretanto, é importantíssimo o treinamento e a qualificação de todo o pessoal envolvido, para que a eficiência da aplicação da técnica seja alcançada.

Há evidência em alguns estudos que as doses recomendadas de certos nutrientes podem ser reduzidas em até 20% quando aplicadas por intermédio da água de irrigação, entretanto, é importante frisar que nem todos os fertilizantes proporcionam resultados satisfatório quando aplicados por intermédio da água de irrigação, e em muitos casos, os métodos convencionais são os preferíveis.

O lançamento no mercado de fertilizantes mais puros, voltados exclusivamente à sistemas fertirrigados demonstra a preocupação de todos os agentes da cadeia produtiva com a necessidade de se nutrir as plantas de forma mais eficiente, e fornecer juntamente com os nutrientes outros produtos de distintas finalidades.

Agradecimentos

Agradecemos aos parceiros profissionais e às empresas de irrigação que nos forneceram algumas das imagens e informações apresentadas.

Agradecemos ao amigo Stocler Manoel de Andrade, da empresa Stocler Engenharia e Consultoria Ltda – Bebedouro, SP, pela cessão do estudo de caso, fruto de seu trabalho prático frente às propriedades de citros do Estado de São Paulo.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL. Anuário Brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal. Abisolo. 2015. Online. Disponível em: <http://abisolo.com.br/n.php?n=custo-da-safra-15-16-de-milho-sobe-30-produtor-deve-ficar-atento>. Acesso em: 5 fev. 2016.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. ANDA. Disponível em: http://www.anda.org.br/estatistica/Principais_Indicadores_2016.pdf. Acesso em: 5 fev. 2016.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: AVI Book, 1992. 652p.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2000. p. 531.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação Princípios e Métodos**. 3. Ed., Ed. UFV, 2009. 355p.
- VILLAS BOAS, R.L.; BOARETTO, A.E.; VITTI, G.C. Aspectos da fertirrigação. In: VITTI, G.C.; BOARETTO, E. (Ed.). **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: Potafos, 1994. p. 283-308.

Parte II

CULTURA

Parte II - CULTURA

CAPÍTULO 19**19 IRRIGAÇÃO DE PASTAGENS**

Luís César Dias Drumond, Fernando Campos Mendonça, André Santana Andrade, Maicon Fábio Appelt e Danielle Morais Amorim

Resumo

Para que serve a irrigação de pastagens? O alto potencial produtivo das pastagens tropicais irrigadas (Taxas de lotação animal de 8-12 UA ha⁻¹) é importante fator de decisão, bem como a necessidade de nutrientes dessas forrageiras, que podem chegar 1800 kg/ha.ano de N. Entretanto, os sistemas de irrigação podem desempenhar diversas funções além do óbvio suprimento de água às forrageiras. Este capítulo inicia com a exposição dos princípios básicos que norteiam a irrigação e a nutrição de pastagens, desde a fonte de água e a vazão outorgável até a qualidade e a disponibilidade de mão de obra. A seguir, discorre sobre o planejamento de investimentos em sistemas intensivos de produção animal, abordando outros fatores dos sistemas de produção afetados pelo uso da irrigação, geralmente negligenciados à primeira vista, tais como a redução da compactação do solo e a sobressemeadura de forrageiras de inverno em pastagens tropicais. As perspectivas e tendências apontam para a Irrigação de Precisão (Irrigação 4.0), com tecnologias associadas a Big Data, Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (AI). No atual estágio tecnológico surgiram plataformas para gerenciamento da irrigação e fertirrigação, o uso de fontes renováveis de energia e equipamentos autônomos na irrigação (robotização). Tais avanços possibilitaram a criação de sistemas multi-tarefa, que realizam atividades de irrigação, nutrição, quimificação, bioirrigação, monitoramento de pragas e doenças, sombreamento, fornecimento de água às plantas e aos animais, e auxílio nas tomadas de decisão sobre as atividades produtivas. Trabalhos sobre viabilidade da irrigação de pastagem devem considerar todos esses aspectos e a decisão sobre o uso da irrigação deve considerar mais que o simples aumento da produção de forragem. O uso de modelos para estimativa do potencial produtivo e verificação dos principais fatores limitantes à produção de forragem em diferentes regiões é fundamental para a decisão, permitindo a estimativa da produção e a simulação de ajustes nos sistemas de produção.

19.1 Introdução

No trabalho com irrigação de pastagem é primordial entender que o sucesso não depende somente do equipamento adquirido. Vários são os fatores que interferem na produção e na qualidade de forragem.

Dentre os fatores que impactam o projeto fertirrigação de pastagem, destacam-se: (i) fonte de água; superficial ou subterrânea, afetando o consumo de energia; (ii) vazão outorgável: bacias hidrográficas em situação crítica (vazão outorgável já concedida) demandam maior investimento devido à necessidade de projetos de barramento; (iii) energia: pode ser combustível (diesel) ou elétrica do Sistema Interligado Brasileiro, de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), de biodigestores, de sistema solar fotovoltaico e de energia eólica; (iv) clima: principal fator que afeta o potencial produtivo das forrageiras; (v) escolha da forrageira (gênero, espécie,

variedade ou híbrido); (vi) fertilidade do solo e interpretação por balanço de massa; (vii) topografia; (viii) disponibilidade de equipamentos de irrigação e fertirrigação; (ix) suprimento de animais para a área intensificada (maior custo do processo); e (x) mão de obra (disponibilidade e qualidade).

Qualquer investimento em técnicas de intensificação da produção animal baseada em pastagem deve ser precedido por um estudo de retorno econômico da atividade proposta, seja leite, carne ou lã, pois a forragem produzida deve colhida eficientemente e transformada em produto animal.

Isto implica no planejamento amplo de investimentos, tanto no sistema de irrigação e fertirrigação quanto em fertilidade do solo e na infraestrutura da fazenda. Para lidar com o aumento na lotação animal é necessário planejar os investimentos em cercas para piqueteamento, corredores, áreas de lazer e sombra, bebedouros e suas tubulações, cochos para suplementação e na aquisição de animais, geralmente o fator de maior demanda financeira.

19.2 Princípios básicos de irrigação e fertirrigação de pastagem

Em sistemas para gado de corte, os principais fatores responsáveis pela variação do resultado econômico são o preço de compra de animais de reposição e o preço de venda de animais, tanto em sistemas de recria quanto de engorda. Diferentemente do senso comum do produtor rural, a irrigação não é uma tecnologia cara. Nos investimentos em sistemas de produção pecuária intensiva em pastagens fertirrigadas, a aplicação total de capital na terra, em média, é de aproximadamente 40 a 50 mil reais por hectare (R\$ ha⁻¹) para gado de corte, enquanto varia de 60 a 70 mil para gado de leite. Essa aproximação refere-se a todo investimento (irrigação, cercas, infraestrutura, animais, e energia elétrica, principalmente), sendo que deste total aproximadamente 30 a 40% refere-se ao sistema de irrigação em sistemas para gado de corte, ao passo que 20 a 30% seria uma proporção aproximada para sistemas para gado de leite.

Todo esse investimento é devido à complexidade do sistema de produção animal a pasto, que é composto por três etapas principais: crescimento, utilização e conversão. Observa-se que a irrigação atua juntamente com outros fatores, como a adubação e as condições climáticas para a produção vegetal, que em conjunto são apenas uma das etapas de produção.

Para que o investimento na primeira etapa (crescimento) resulte em retorno econômico, é necessário estar atento às demais etapas (utilização e conversão), o que implica em eficiência de utilização da forragem produzida. É necessário que os animais consumam o máximo possível da forragem produzida, para que o desperdício não anule o aumento da produção. Nesta etapa atua, principalmente, o manejo do pastejo. Adicionalmente, a forragem consumida deve ser eficientemente convertida em produto animal. Isso significa que o animal deve ganhar peso ou produzir leite, e nesta etapa também atua o equilíbrio nutricional da forragem e da dieta, e o mérito genético dos animais.

Além de a irrigação ser um dos fatores de aumento da produção vegetal devido ao suprimento de água, ela também interfere em outros fatores de custo de produção. Destacam-se a redução da compactação e danos às forrageiras causados por máquinas, e a possibilidade de aplicação de fertilizantes via equipamento de irrigação (fertirrigação), que reduz os custos de aplicação e aumenta a eficiência de uso dos nutrientes.

O uso da fertirrigação também otimiza o uso da terra – que tem valorização crescente – e da infraestrutura do sistema de produção, pois aumenta a segurança e a flexibilidade do sistema de produção em termos de mercado, aumenta a escala de produção e possibilita adquirir e vender animais em períodos variados do ano. No sistema de produção de carne, permite firmar contratos com frigoríficos, com valorização da carcaça produzida.

O uso da fertirrigação em pastagens tem função mais importante que a simples aplicação de água à pastagem. Estimula o produtor a fazer adubação, a manejar melhor a fertilidade do solo e a pastagem, investir em tecnologia, otimizar o uso de recursos naturais e incrementar o planejamento de seus investimentos. Assim, colabora para aumentar a esperança de sucesso da atividade pecuária.

Nossa experiência no trabalho com irrigação e fertirrigação em pastagens permite observar que a avaliação de sua viabilidade nas várias regiões brasileiras deve levar em consideração as características climáticas, principalmente temperatura e precipitação pluvial. Para haver resposta satisfatória à irrigação é necessário que a temperatura permita o crescimento da espécie forrageira de interesse. Entretanto, além do clima há outros fatores que devem ser levados em consideração: espécie forrageira utilizada, tipo de solo, características topográficas (forma e relevo da área), disponibilidade e distância da água à área, disponibilidade e fonte de energia elétrica, valor agregado da produção, eficiência da unidade produtiva, intensidade de uso e valor da terra, custo de alimentos suplementares, questões operacionais da fazenda, mercado de animais, afinidade do produtor com a atividade, e subsídios do governo.

Muitos trabalhos científicos avaliaram a viabilidade da irrigação de pastagem, porém, geralmente os trabalhos não consideram todos esses fatores. Assim, a tomada de decisão deve ser mais ampla. A depender da situação, a fertirrigação de pastagem pode, ou não, ser viável em qualquer região do Brasil. Por isso, a interpretação sobre tal viabilidade deve ser tomada com o devido conhecimento sobre o tema e sistemas de produção.

Para as forrageiras tropicais mais comumente utilizadas em áreas irrigadas (*Panicum*, *Pennisetum*, *Cynodon* e *Brachiaria*), a resposta é diretamente proporcional ao período em que há temperaturas altas e ausência de chuvas. Espécies adaptadas a clima temperado (Ex.: aveia, azevém, etc.) apresentam resposta satisfatória à irrigação em períodos de frio e seca do Brasil. Na maioria da área das regiões Sudeste e Centro-Oeste, os períodos seco e frio coincidem. Nessas condições é importante considerar a temperatura basal inferior das espécies utilizadas e utilizar estudos de modelagem do crescimento de plantas forrageiras, principalmente os que utilizam a associação entre produção de forragem e o acúmulo de graus-dias de desenvolvimento (GDD).

Na irrigação de pastagem a condição física dos solos é de extrema importância, devido à alta carga animal. Na época de chuvas, solos muito argilosos podem apresentar problemas no manejo. Assim, muda-se alguns conceitos, pois corrigir a fertilidade de um solo geralmente tem custo inferior ao da implantação de um sistema de drenagem. Exceto em solos salinos, os atributos químicos assumem importância secundária, visto que na maioria das vezes é possível a correção de problemas como acidez e concentrações tóxicas de alumínio e manganês por meio de corretivos (calcário, silicatos, óxidos, hidróxidos, entre outros) ou de adubação.

É possível afirmar que, para sistemas altamente intensivos, solos com textura média a grosseira (arenosos) são mais adequados a sistemas de produção com fertirrigação, devido à menor formação de áreas encharcadas e barro, especialmente em áreas de lazer, ao redor de cochos e bebedouros, e em corredores de acesso. O

monitoramento de elementos químicos e práticas de manejo devem ser ajustados em função das características do solo.

Não é recomendada a irrigação de pastagens em solos mal drenados e/ou com probabilidade de alagamento em alguns períodos do ano. Tal fato se deve às limitações ambientais ao uso de adubação intensiva, à necessidade de uso de espécies tolerantes específicas – que podem não ser as mais recomendadas para altos níveis de produção – e às complicações operacionais e de manejo no período chuvoso. Novas variedades vêm sendo desenvolvidas e estudadas para tais áreas (Ex.: *Panicum* PM455) e o avanço das pesquisas devem levar a mudanças em breve.

Com relação ao local de instalação do equipamento, deve-se considerar a distância e o desnível do ponto de captação de água à área irrigada. Em situações de grande distância ou desnível elevado, pode-se projetar um reservatório em um ponto previamente estudado e fazer uma avaliação econômica do projeto. Tal alternativa é particularmente interessante quando há limitações de água e/ou energia elétrica, que são situações muito frequentes, pois pode-se bombear para o reservatório por um período de até 21 h dia⁻¹ e irrigar durante a noite. Isto resulta em aumento da área irrigada e redução do custo de energia dos sistemas de fertirrigação.

O processo de implantação e utilização da irrigação e fertirrigação em pastagens demanda conhecimento técnico adequado em todas as fases (projeto, implantação, uso e avaliação de desempenho técnico e econômico). Por isso, é importante que haja um esforço contínuo, em escala nacional, para o treinamento e a capacitação de profissionais ao trabalho com a produção animal em áreas irrigadas. Embora tal iniciativa já seja tomada por diversas instituições brasileiras, ainda pode ser aprimorada por meio do estabelecimento de indicadores de performance e eficiência de sistemas de irrigação e fertirrigação. Qualquer sistema de produção deve ter acompanhamento técnico de profissionais da área. Quanto maiores o profissionalismo aplicado e a busca de conhecimento (como visitas em áreas de sucesso), maiores as chances de sucesso de um projeto.

19.3 Potencial produtivo de pastagens fertirrigadas

O potencial produtivo de pastagens é determinado por vários fatores, manipuláveis ou não. As condições climáticas constituem os fatores não manipuláveis e geralmente são os principais a considerar na determinação do potencial produtivo e da resposta à irrigação, denominado de potencial produtivo climático. Os fatores de maior impacto são disponibilidade hídrica, temperatura e radiação solar. No caso das pastagens irrigadas, o foco pode se resumir aos dois últimos, pois a irrigação suprirá parcial ou integralmente a demanda das plantas.

As produtividades alcançadas com forrageiras tropicais fertirrigadas são consideravelmente altas. Vários projetos em regiões de clima tropical já alcançam produtividade anual 40 a 60 toneladas de matéria seca por hectare (t [MS] ha⁻¹), capaz de sustentar 8 a 12 Unidades Animais por hectare (UA ha⁻¹; 1 UA = 450 kgf de peso vivo).

Para atingir tais níveis de produtividade, as plantas forrageiras chegam a extrair mais de 900 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio (N) em sistemas de pastejo, e mais de 1.800 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N em sistemas de produção e corte de forragem (DRUMOND; AGUIAR, 2005; MELO *et al.*, 2020).

Na determinação do potencial produtivo, geralmente se considera cada espécie e/ou cultivar separadamente, porém, genótipos com comportamento semelhante em determinados sistemas podem ser agrupados. A estimativa do potencial produtivo real

pode ser feita por meio de modelos matemáticos, que requerem informações climáticas, bem como informações sobre fertilidade do solo e adubação, características físicas do solo, sanidade das plantas, estrutura em que a pastagem é mantida (quantidade e qualidade da área foliar), efeitos diretos (frequência e intensidade de desfolha) e indiretos do pastejo (pisoteio, distribuição de excretas, etc.), e mão de obra.

Há muitos tipos de modelos, com diferentes níveis de complexidade e número de variáveis consideradas. Geralmente os modelos de estimativa do potencial produtivo que consideram somente temperatura, balanço hídrico e adubação nitrogenada são satisfatórios para plantas sem estímulos fisiológicos específicos. Em condições de irrigação total (sem *deficit*) pode-se excluir o balanço hídrico, assim, modelos simples podem executar boas estimativas de produção de forrageiras irrigadas que se tornam importantes ferramentas no planejamento de um projeto.

Modelos agrícolas integram conhecimentos multidisciplinares, como física e química do solo, fisiologia e melhoramento vegetal, agrometeorologia e manejo, dentro de equações matemáticas utilizadas para prever crescimento, desenvolvimento e produção (HOOGENBOOM, 2000). Assim, auxiliam na organização, interpretação e aplicação do conhecimento científico atual, sugerindo prioridades na pesquisa pela identificação de lacunas no conhecimento e estímulo de novas ideias.

A modelagem tem sido uma ferramenta eficaz na simulação do crescimento de plantas com significativos avanços nos últimos anos, principalmente devido ao aumento da demanda por previsões de safras, estudos sobre mudanças climáticas e avanços da informática (DOURADO-NETO *et al.*, 1998a). Os usuários de modelos acompanharam essa evolução e estão crescendo em número e grau de sofisticação (GRABLE, 1987). No entanto, cuidados devem ser tomados, principalmente em relação às limitações intrínsecas de cada modelo. É necessário fazer a validação para cada cultura e região, de modo a garantir a qualidade dos dados e a confiabilidade dos resultados. As maiores limitações na geração e uso dos modelos são o histórico disponível do sistema a ser simulado e a disponibilidade de dados de entrada (HOOGENBOOM, 2000).

Modelos variam de muito simples (uma equação linear) a extremamente complexos (milhares de equações) (HOOGENBOOM, 2000), e podem ter várias classificações: estáticos ou dinâmicos, discretos ou contínuos, determinísticos ou estocásticos e mecanísticos ou empíricos.

Modelos dinâmicos têm o tempo como variável, e os estáticos, não. Tanto os discretos quanto os contínuos são dinâmicos. Nos contínuos, porém, o tempo é um valor real (exemplo 2, 24 h), enquanto nos discretos o tempo é identificado por valores inteiros (exemplo 2 h).

Modelos estocásticos contêm algum elemento de aleatoriedade ou distribuição de probabilidade; os determinísticos, não (TEH, 2006). Modelos para predição da produção de MS de plantas geralmente são determinísticos e dinâmicos: buscam representar as respostas de um sistema responde ao longo do tempo, sem distribuição de probabilidade associada (THORNLEY; JOHNSON, 1990). Podem ser mecanicistas ou empíricos e são o alvo desta revisão.

Os modelos mecanicistas consideram os conhecimentos dos processos físicos, químicos e biológicos que governam os fenômenos em estudo (TEH, 2006), permitindo o entendimento e uma provável extrapolação das condições em que foram gerados. No entanto, são necessárias mais informações para a sua geração e utilização, por isso, são mais utilizados na pesquisa.

Os modelos empíricos (também chamados de correlativos ou estatísticos) são de geração simples e fácil aplicação. No entanto, estão sujeitos a maiores erros e são limitados à faixa de condições em que foram gerados (DOURADO-NETO *et al.*, 1998b). São elaborados buscando a correlação entre produção ou crescimento de plantas com uma ou mais variáveis (temperatura, radiação, disponibilidade hídrica e de nutrientes, especialmente o nitrogênio). Atualmente, são os mais estudados nas condições tropicais (CRUZ *et al.*, 2011; TONATO *et al.*, 2010).

Obviamente, a escolha do tipo de modelo a ser utilizado dependerá dos objetivos da previsão e da disponibilidade de informações. Os modelos empíricos são os de mais fácil utilização, principalmente devido à disponibilidade de dados. Assim, neste capítulo vamos abordar somente a aplicação desse modelo.

A análise de regressão é a técnica mais comum de gerar modelos matemáticos empíricos. As técnicas de regressão são utilizadas visando gerar equações capazes de estimar a produção de plantas (variável dependente) em função de fatores relacionados (variáveis independentes). As variáveis meteorológicas são as mais comuns (HOOGENBOOM, 2000).

As principais variáveis utilizadas na geração de modelos para forrageiras são as temperaturas do ar (máxima – T_x , média – T_d e mínima – T_n), a radiação solar global (R_g), o fotoperíodo (N) e a disponibilidade de água no solo. Frequentemente outras variáveis são calculadas visando melhorar a capacidade preditiva, principalmente as somas térmicas em: (i) graus-dia (GD) (OMETTO, 1981), que relaciona o acúmulo de temperaturas ocorridas entre um ou dois limites de temperatura-base (inferior, ou inferior e superior) e o crescimento de plantas; (ii) Unidades Fototérmicas (UF) (VILLA NOVA *et al.*, 1983), que considera os GD e o fotoperíodo; e (iii) o Índice Climático de Crescimento (ICC) (FITZPATRICK; NIX, 1973), que leva em consideração a R_g , um índice térmico de crescimento da planta e um fator de penalização hídrico, geralmente a relação entre a evapotranspiração real (E_{Tr}) e a potencial (E_{Tp}).

Como os valores exatos não são conhecidos, o uso de valores com pequenos desvios na modelagem do crescimento pode resultar em grandes erros nas estimativas de produção. Assim, é importante que na aplicação dos modelos sempre se considere a temperatura-base utilizada ou estimada pelo autor do modelo, pois apesar de ser considerada fixa para cada espécie, variações têm sido observadas entre trabalhos (Tabela 1).

Modelos recentes com boa capacidade preditiva da produção de forrageiras geradas por Araujo *et al.* (2013), Cruz *et al.* (2011), Pezzopane *et al.* (2012), Rodrigues (2004) e Tonato *et al.* (2010) estão sumarizados na Tabela 2. A temperatura média dos experimentos que geraram a base de dados destes modelos situou-se entre 16 e 26°C, aproximadamente.

Os modelos variam entre espécies e cultivares, no entanto, alguns foram agrupados para forrageiras com respostas semelhantes. Em geral os modelos gerados são lineares univariados, sendo, portanto, simples e de fácil aplicação. Os ajustes têm variado desde coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 0,40 até 0,87, a depender do genótipo e da variável utilizada.

A síntese desses modelos (Tabela 2) permite afirmar que os de melhor ajuste (maior R^2) foram baseados em disponibilidade térmica e hídrica, com a variável evapotranspiração real (E_{Tr}), ou temperatura, ou graus-dia associados ao um índice baseado no balanço hídrico (GD_{corr}).

Tabela 1. Temperatura-base inferior para diferentes gramíneas tropicais e subtropicais determinadas em condições de campo no Brasil.

Poácea	T _{bi} (°C)	Referência
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	17,2	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	18,6	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	16,3	Lara (2007)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	15,0	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Arapoty	17,8	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Capiporã	18,3	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés	19,0	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk	16,7	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Napier	13,9	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Napier	15,0	Villa Nova <i>et al.</i> (2007)
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	15,6	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	15,0	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Paspalum atratum</i> cv. Pojuca	15,6	Mendonça e Rassini (2006)
<i>Cynodon nlemfuensis</i> cv. Florico	11,5	Villa Nova <i>et al.</i> (2007)

Tabela 2. Modelos empíricos lineares univariados (Coeficiente angular: a. Coeficiente linear: b) correlacionando produção de matéria seca com temperatura ou variáveis relacionadas.

Poácea	Variável	a	b	R ²	Referência
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	T _n	11,93	-134,95	0,73	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	T _{n,corr}	5,78	-17,24	0,75	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	GD _{corr} *	12,9	6,52	0,75	Cruz <i>et al.</i> (2011)
<i>Brachiaria</i> Grupo 1 ^a	T _n	8,19	-94,92	0,55-0,50	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Brachiaria</i> Grupo 2 ^b	T _n	10,66	-128,07	0,55-0,60	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Cynodon</i> Grupo 1 ^c	T _n	9,06	-84,69	0,60-0,70	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Cynodon</i> Grupo 2 ^d	T _n	7,97	-67,01	0,60-0,70	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Panicum</i> Grupo 1 ^e	T _n	6,36	-55,22	< 0,40	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>Panicum</i> Grupo 2 ^f	T _n	5,93	-29,15	< 0,40	Tonato <i>et al.</i> (2010)
<i>B. brizantha</i> cv. Marandu	T _n	0,98	-11,92	0,59	Rodrigues (2004)
<i>B. brizantha</i> cv. Arapoty	T _n	0,95	-10,30	0,64	Rodrigues (2004)
<i>B. brizantha</i> cv. Capiporã	T _n	1,10	-13,23	0,83	Rodrigues (2004)
<i>B. brizantha</i> cv. Xaraés	T _n	1,09	-13,55	0,74	Rodrigues (2004)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣUF	0,226	600,01	0,86	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣICC	368,14	-311,94	0,83	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣGD	11,52	-304,8	0,78	Araujo <i>et al.</i> (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	ETr	34,73	-21,58	0,87	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	GD _{corr} *	18,80	-17,02	0,84	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	GD _{corr} **	18,90	-6,38	0,87	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	ICC	330,09	-12,88	0,84	Pezzopane <i>et al.</i> (2012)

^a Marandu, Basilisk e Arapoty; ^b Capiporã e Xaraés; ^c Tifton 85 e Estrela; ^d Coastcross, Florico e Florona; ^e Atlas e Mombaça; ^f Tanzânia e Tobiatã; T_{n,corr}=Temperatura mínima corrigida por fator de penalização hídrica; GD_{corr}=Graus-dia (calculado com base na T_{bi}) corrigido por fator de penalização hídrica; *pela relação ETr/ETp e **pela relação Armazenamento atual/máximo do solo; ICC=índice climático de crescimento diário; ΣUF=soma diária de unidades fototérmicas; ΣICC=soma do ICC; ΣGD=soma dos graus-dia. Observação: (i) A variável resposta (y) é a taxa de acúmulo de forragem (kg [MS] ha⁻¹ dia⁻¹), exceto para os modelos de Araujo (2011), gerados com as somas diárias de todo o ciclo, em que a variável resposta (y) é a massa de forragem total em cada ciclo. (ii) Os valores de temperatura são dados em graus celsius (°C). (iii) Os dados de Rodrigues (2004) estão transformados pela raiz quadrada.

Quanto menor o intervalo de tempo utilizado para o cálculo da variável, melhor será a estimativa. O ideal é o uso de dados diários, porém, estes geralmente não estão disponíveis. Nos modelos de Cruz *et al.* (2011) e Pezzopane *et al.* (2012), o balanço hídrico foi realizado em escala de cinco dias. Entretanto, em muitas regiões não é possível a obtenção de dados climáticos diários. Se um técnico ou pecuarista deseja

saber o potencial de produção de forragem em determinada região para avaliar a viabilidade de um projeto, necessita ter acesso aos dados de estações meteorológicas próximas. Se não for possível, as estimativas podem ser realizadas com base em dados de médias mensais, de mais fácil obtenção, mas a interpretação dos resultados deve ser feita com cautela. Meses de chuvas intensas e concentradas frequentes, por exemplo, podem gerar médias mensais de alta disponibilidade hídrica, mesmo que ocorram períodos de 15 a 20 dias sem chuvas. Neste caso, pode haver superestimativa do potencial produtivo.

Para suprir a falta de dados de estações meteorológicas locais, podem ser utilizadas bases de dados como a NASA Power (<https://power.larc.nasa.gov/>) e a Global Weather (<https://power.larc.nasa.gov/>), que utilizam a combinação de dados de estações meteorológicas, satélites meteorológicos, modelos matemáticos e sistemas de georreferenciamento que possibilitam a estimativa de dados locais em escala diária.

Por outro lado, nas áreas irrigadas parte-se do pressuposto que não há *deficit* hídrico, com reposição integral da evapotranspiração. Portanto, as simulações podem ser simplificadas ao uso da temperatura ou de graus-dia, e os erros oriundos da disponibilidade hídrica são reduzidos. Tal como discutido anteriormente, aplicações de modelos empíricos devem ser realizadas em situações semelhantes àquelas de obtenção do modelo.

Para exemplificar, pode-se considerar o potencial para diferentes regiões e tomar o modelo empírico de Pezzopane *et al.* (2012) para estimativa da produção de matéria seca de *P. maximum* cv. Tanzânia com base na evapotranspiração real (ETR) (Tabela 2). Foram realizadas estimativas para condições irrigadas e de sequeiro para as localidades de Presidente Prudente-SP, Uberaba-MG e Porto Nacional-TO (Figura 1). Considerando os dados climáticos normais com escala mensal (BD Clima, 2013), o modelo foi composto pela equação linear:

$$\text{TAF} = 34,73 \times \text{ETr} - 21,58 \quad (p < 0,01, r^2 = 0,87, \text{ amplitude de } 0,62 \text{ a } 4,02).$$

Em que:

TAF = taxa de acúmulo de forragem média (kg [MS] ha⁻¹ dia⁻¹); e

ETr = evapotranspiração real (mm).

Uma vez que no balanço hídrico utilizado calcula-se a ETR considerando o *deficit* hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), estipulou-se que na condição irrigada não há *deficit* hídrico e a evapotranspiração real é igual a evapotranspiração potencial (ETr = ETp). Observa-se claramente o aumento da resposta das forrageiras à irrigação com o aumento da intensidade ou extensão de condições de alta temperatura e limitação hídrica, especialmente na primavera.

Em Porto Nacional (TO), o "inverno" apresenta temperaturas altas e um período seco. Por isso, a diferença de produção entre a condição irrigada e de sequeiro é bem superior à das demais localidades (inverno seco e frio).

No entanto, o ganho em produção de matéria seca necessário para viabilizar a implantação do sistema de irrigação deve ser convertido em desempenho animal por área. O ajuste deve ser realizado com aumento em taxa de lotação que, dentro de certos limites, proporcionará um resultado ótimo por área. Se a alteração em produção de forragem não for acompanhada de ajuste na taxa de lotação, o efeito será transferido ao desempenho dos animais. Neste exemplo, uma alta taxa de lotação poderia ser mantida com ganho de peso diário médio adequado na condição irrigada, mas não na condição de sequeiro.

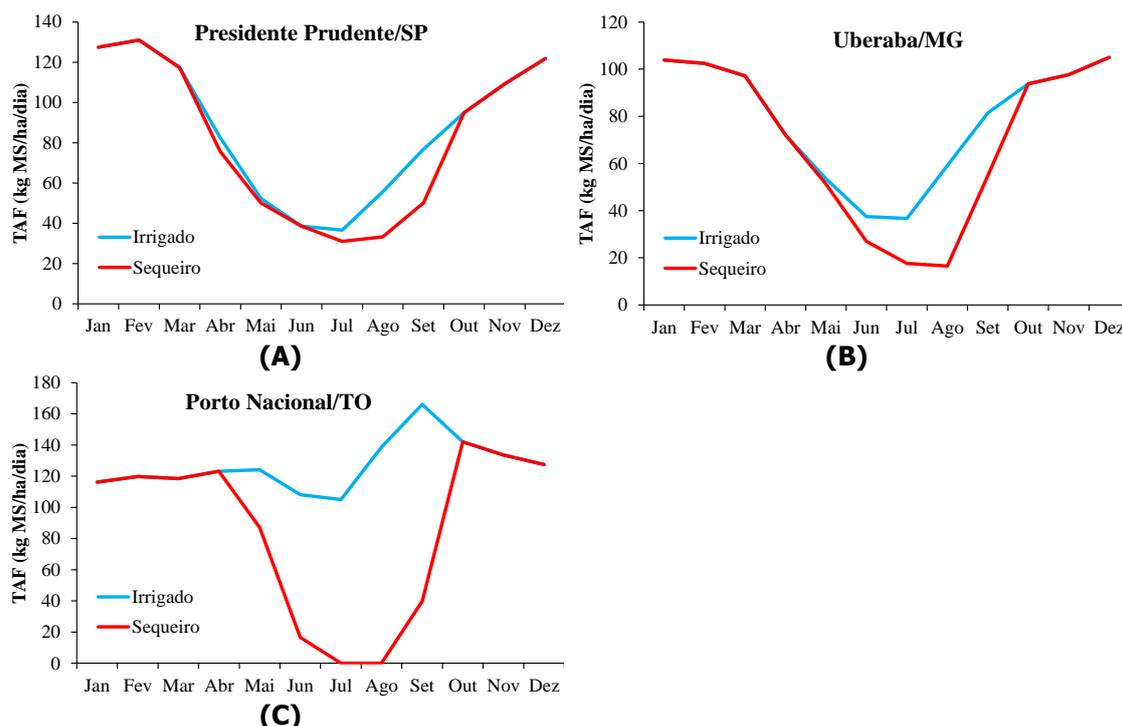


Figura 1. Taxa de acúmulo média mensal (kg [MS] ha dia⁻¹) do capim-Tanzânia simulada por modelo empírico (PEZZOPANE *et al.*, 2012) em condição irrigada e de sequeiro em três localidades: (A) Presidente Prudente, SP; (B) Uberaba, MG; e (C) Porto Nacional, TO. Dados climáticos: BD Clima (2013).

Em regiões com clima de inverno frio e seco, uma alternativa para aumento da produção de forragem é a sobressemeadura de espécies de inverno nas pastagens tropicais irrigadas. A sobressemeadura é utilizada há muito tempo na região Sul do Brasil, onde o inverno é chuvoso, mas passou a ser utilizada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, principalmente em sistemas de produção de leite.

As espécies mais utilizadas das áreas de pastagens com sobressemeadura são a aveia preta (*Avena strigosa*) e o azevém anual (*Lolium multiflorum*) (MENDONÇA, 2021), mas há outras opções, como os cereais de duplo propósito utilizados na região Sul (trigo, aveia branca, cevada, centeio e triticale) (FONTANELI *et al.*, 2016). O uso de várias espécies hibernais colabora para equilibrar a oferta de forragem no período de estacionalidade das forrageiras tropicais, pois a produção de cada espécie ocorre em diferentes períodos: aveias são precoces (60% em junho e julho) e o azevém, tardio (70% entre agosto e setembro) (POSTIGLIONI, 1982).

Os dados provenientes do trabalho de Oliveira *et al.* (2005) mostram que o ganho em lotação animal de até 70% no período de outono-inverno, passando de 2,5-3,5 a 5-6 UA ha⁻¹.

Uma revisão de literatura feita por Rodrigues *et al.* (2011) tratando da sobressemeadura mostrou resultados diversos, de acordo com a combinação de forrageiras tropicais e hibernais. Os autores concluíram que os resultados são melhores em forrageiras tropicais e subtropicais de porte baixo (Ex.: gênero *Cynodon*) e com rebaixamento mais acentuado nas forrageiras de porte alto (Ex.: gêneros *Panicum* e *Pennisetum*).

Mais detalhes sobre a sobressemeadura e seus benefícios em sistemas de produção animal podem ser encontrados em uma extensa revisão sobre o tema no

trabalho de Mendonça (2021).

19.4 Sistemas de irrigação mais utilizados em pastagem

Inicialmente, a irrigação de pastagens foi feita com sistemas de baixo nível tecnológico. Geralmente o sistema de irrigação apresentava equipamentos superdimensionados (aspersores, tubos, bomba, entre outros), alto consumo de energia por área, baixa uniformidade de distribuição, baixo custo de aquisição e implantação (principal atrativo para o produtor rural) e alto custo total (aquisição + implantação + financeiro + manutenção + mão de obra + energia).

A revolução que levou às melhorias significativas dos sistemas de irrigação utilizados em pastagens foi possível graças a cinco fatores: (i) evolução tecnológica dos equipamentos de irrigação; (ii) treinamento de projetistas por meio de empresas públicas e privadas; (iii) mudança na conjuntura econômica nacional (novas linhas de crédito, redução da inflação e dos juros para financiamento agrícola); (iv) treinamento de profissionais de assistência técnica e extensão rural voltados aos sistemas de produção animal; e (v) uso da Internet para ampla divulgação de conceitos adequados aos projetos de sistemas (vídeos, textos online, livros técnicos palestras, entre outros).

A evolução dos equipamentos de irrigação e o treinamento de projetistas possibilitaram o acesso do produtor rural a sistemas mais eficientes em termos de uso de água e energia.

As linhas de crédito (Pronaf, ModerInfra, entre outras) facilitam o acesso a recursos financeiros para a aquisição de sistemas de irrigação.

Tão importante quanto o acesso ao crédito é saber o momento adequado de solicitá-lo. O profissional de assistência técnica e extensão rural auxilia o produtor rural no monitoramento de seu sistema de produção, inclusive as condições financeiras de seu negócio. Assim, pode orientar o produtor a solicitar o crédito apenas quando o investimento for economicamente viável.

Finalmente, o uso adequado da Internet possibilita aos técnicos e produtores um amplo acesso a informações técnicas e a estudos de casos sobre a irrigação de pastagens (artigos técnicos e científicos, livros, palestras, vídeos, entre outros), bem como possibilitou a discussão e a troca de informações por meio de aplicativos de smartphones para comunicação rápida. Tal como em outros setores do agronegócio, essa conjuntura é única na história da irrigação e permite a rápida evolução que se atualmente vê.

Tal revolução tem levado à redução do custo total de irrigação (aquisição, implantação, financeiro, mão de obra e energia), aumentando a eficiência de distribuição de água, permitindo o emprego de técnicas de manejo de água na área irrigada e resultando em aumento da probabilidade de sucesso na irrigação de pastagens.

Basicamente, a irrigação em pastagens é feita por aspersão, principalmente por sistemas de aspersão convencional fixa e pivô central, mas também há pastagens irrigadas com autopropelido (carretel enrolador). Recentemente surgiram áreas de pastagem com irrigação localizada por gotejamento subsuperficial, principalmente em regiões de clima semiárido ou com grande competição pelo uso de água.

Neste trabalho serão apresentados e caracterizados os sistemas mais utilizados atualmente (aspersão convencional e pivô central).

19.5 Irrigação por aspersão

A maioria dos sistemas de irrigação utilizados em pastagens é composta por sistemas de aspersão convencional e pivôs centrais. De modo geral, a aspersão convencional é utilizada em áreas menores (até 40 ha) e com formato regular (quadrada ou retangular) ou irregular, e praticamente em qualquer relevo (plano, ondulado e acidentado). Já o pivô central é o equipamento mais utilizado em grandes áreas (RICHTER, 2012).

Inicialmente, os sistemas de aspersão convencional eram móveis ou semifixos, e atualmente a maioria dos sistemas instalados é de aspersão fixa. Tais sistemas são comumente empregados em pequenas propriedades rurais, principalmente na produção de leite, cuja maioria tem área igual ou inferior a 20 ha na maior parte do Brasil (Tabela 3). Embora seja mais raro, tais sistemas também são instalados em áreas maiores (até 75 ha), principalmente aquelas com formato e/ou relevo que dificultem a utilização de pivôs centrais.

Tabela 3. Distribuição das propriedades produtoras de leite, no Brasil e por região (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017).

Classe de área (ha)	Área acumulada (%)					
	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
≤ 1	0,84	0,18	1,64	0,55	0,79	32,66
1 - 5	11,26	1,93	17,34	10,64	11,78	65,16
5 - 10	24,48	5,17	32,10	24,28	29,07	73,53
10 - 20	45,61	13,98	50,97	45,41	60,38	81,73
20 - 50	73,38	47,17	75,88	72,66	88,47	89,57
50 - 100	86,23	71,39	87,68	86,13	95,67	94,03
100 - 200	93,23	85,95	94,21	93,83	98,10	96,70
200 - 500	97,61	94,49	98,24	98,43	99,39	98,37
500 - 1000	99,00	97,39	99,42	99,54	99,78	99,15
1000 - 2500	99,73	99,20	99,87	99,94	99,96	99,63
2500 - 10000	99,97	99,93	99,99	100	100	99,88
≥ 10000	100	100	100	100	100	100

O pivô central é o sistema mais empregado em áreas superiores a 40 ha, devido à redução do custo fixo (aquisição e implantação), pois enquanto o comprimento da linha lateral (tubulação aérea) cresce linearmente (comprimento, em m), a área irrigada cresce ao quadrado (área, em m²).

19.5.1 Aspersão convencional fixa

Inicialmente, a irrigação por aspersão em pastagens foi feita com sistemas de aspersão convencional móvel ou semifixa, com linha principal fixa e linhas laterais móveis (tubulações em que estão os aspersores), aproveitando o conceito pré-existente utilizado em outras culturas (Figura 2). Tais sistemas têm baixo custo fixo (aquisição e implantação), e alto custo variável (manutenção, mão de obra e energia), em relação

aos sistemas fixos. As avarias em tubulações são comuns, devido ao processo de desmontagem, transporte e remontagem.

Muitos sistemas eram montados sem projeto de dimensionamento, o que acarretava no uso de aspersores com alta pressão de serviço ($\geq 40 \text{ mca}^4$), alta relação entre energia consumida e área irrigada (potência/área de $5\text{-}15 \text{ cv ha}^{-1}$) e alto custo operacional (mão de obra e energia).

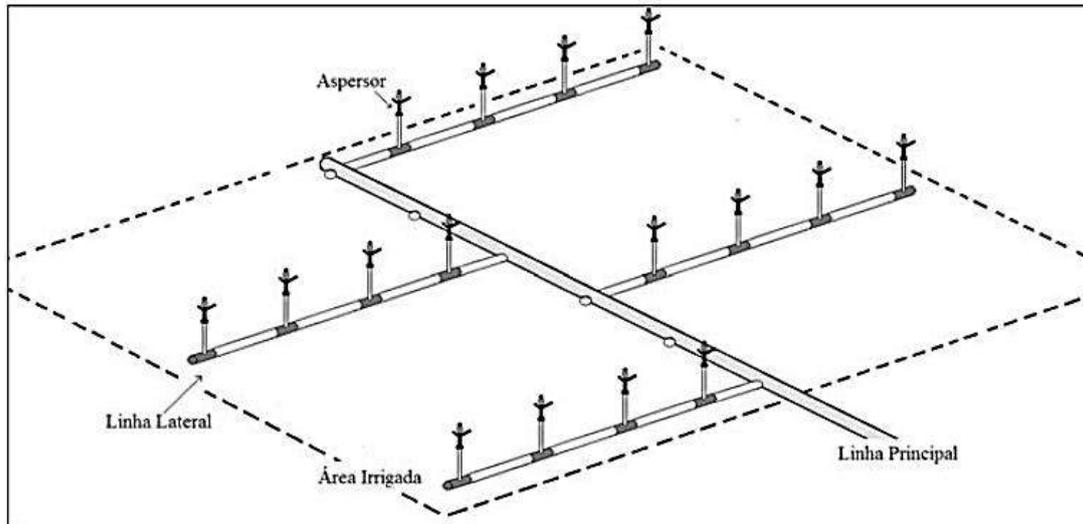


Figura 2. Esquema de um sistema de aspersão convencional semifixa (linhas laterais móveis) (BISCARO, 2009).

Os sistemas fixos passaram a ser utilizados para reduzir os custos de manutenção e operação. São compostos por linha principal enterrada (saída única de água), linhas de derivação (múltiplas saídas) e linhas laterais (geralmente múltiplas saídas) (Figura 3).

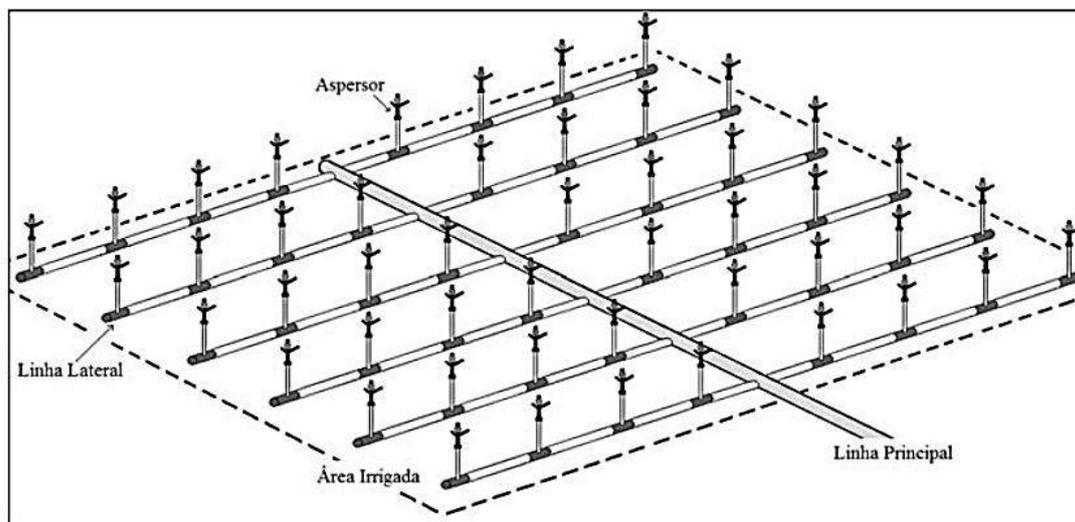


Figura 3. Esquema de um sistema de aspersão convencional fixa (BISCARO, 2009).

Tais sistemas têm maior custo fixo e menor custo variável que os sistemas móveis. Aproveitam conceitos empregados na irrigação localizada (cavaletes, linhas de derivação e distribuição de água em setores). São projetados para trabalhar com

⁴ mca: metros de coluna de água (medida prática de pressão). 1 mca = $0,1 \text{ kgf cm}^{-2}$.

aspersores de baixa ou média pressão de serviço (10 a 30 mca), têm baixa relação potência/área (1,0-2,5 cv ha⁻¹) e possibilitam operação automática, com acentuada redução do custo operacional (energia e mão de obra).

Um sistema que foi utilizado em muitas áreas durante a transição da aspersão semifixa para os sistemas fixos foi a aspersão em malha. Nesse sistema, duas tubulações de linhas laterais têm sua extremidade interligada (Figura 4), formando a "malha". Em cada malha é colocado apenas um aspersor. Como a vazão do aspersor é dividida em duas tubulações, pode-se utilizar aspersores com vazão relativamente alta em tubos de pequeno diâmetro (Ex. 3,0 m³ h⁻¹ em tubos de 32 mm) e o custo de implantação é reduzido em relação aos sistemas fixos com tampão final (fundo cego).

A aspersão em malha permite que os custos fixos (aquisição e implantação) e o custo de energia sejam mais baixos que nos demais sistemas fixos. Entretanto, o sistema já não tem sido tão utilizado por conta de dificuldades operacionais em áreas de pastejo rotacionado. O operador de campo deve fazer ao menos uma troca diária dos aspersores, o que demanda mais tempo e custo que nos sistemas em que os aspersores são fixos. O trabalho necessário na troca inclui a passagem por várias cercas que, inclusive, podem ser eletrificadas, aumentando a chance de o operador receber descargas elétricas (choques).

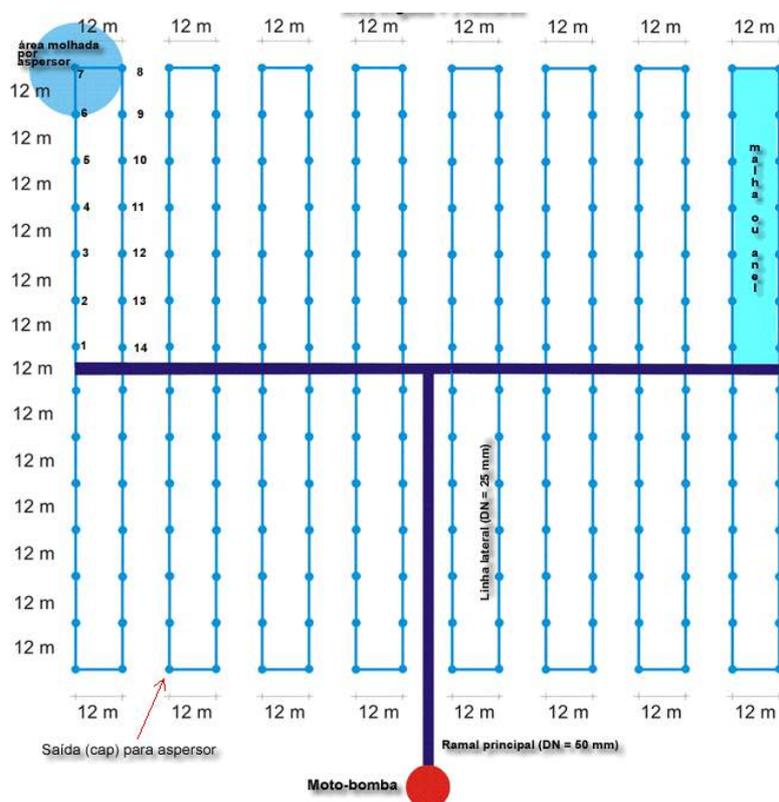


Figura 4. Esquema de um sistema de aspersão em malha (Rede Agronomia: <https://agronomos.ning.com/profiles/blogs/irrigacao-de-pastagens-por>).

Atualmente predomina o uso de aspersão setorizada, devido à praticidade de operação. A área é dividida em setores, que são irrigados individualmente e compostos por cavalete, linha de derivação e linhas laterais (Figuras 5 e 6).

Os setores podem ser divididos em duas (2) partes para reduzir a vazão em um ponto intermediário da linha principal (LP). No exemplo apresentado na Figura 5, o sistema tem 4 setores subdivididos e a vazão é reduzida a partir do ponto em que a LP

é representada na cor azul claro. Tal redução de vazão resulta em menor diâmetro da tubulação a partir do ponto indicado, com redução da potência e do custo de aquisição do conjunto motobomba e do custo de energia.

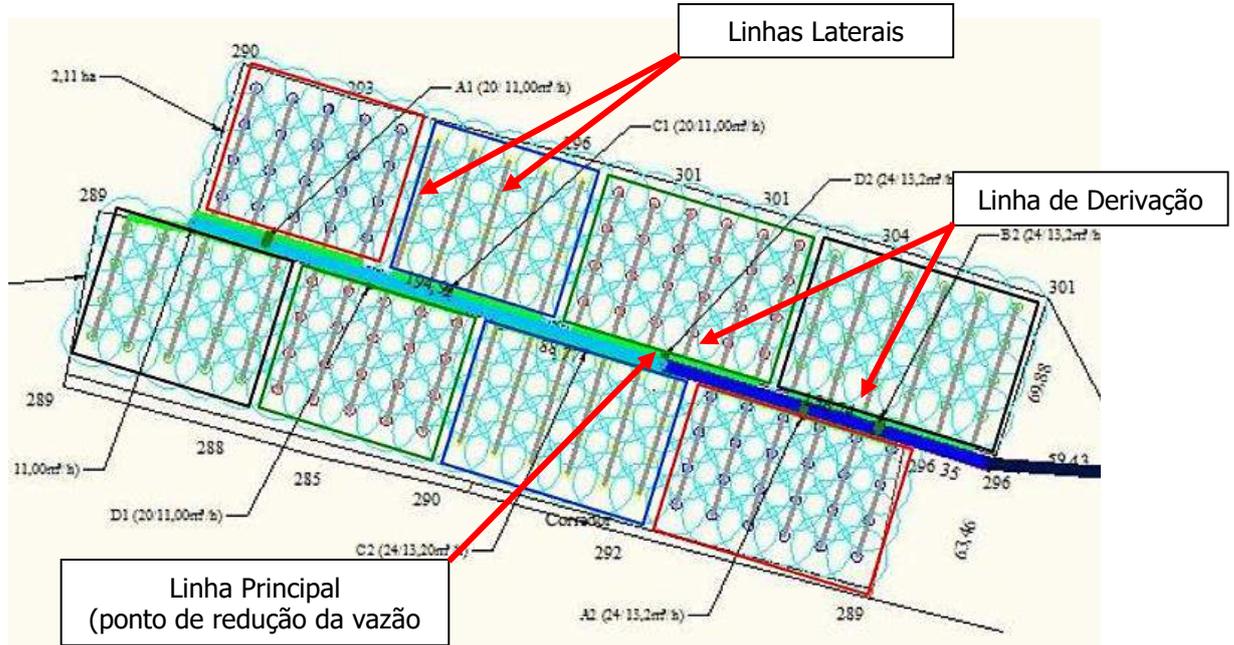


Figura 5. Esquema de sistema de aspersão convencional fixa, com setores distintos por cores e subdivididos (2 partes por setor) (IrrigaRural).

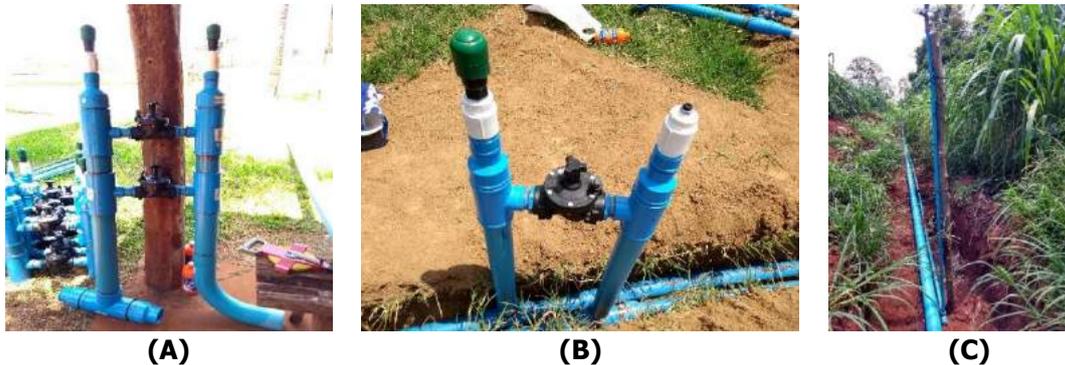


Figura 6. Componentes de um setor de sistema de aspersão convencional fixa: cavalete duplo (A); cavalete simples e linha de derivação (B); e linha lateral (C). Fontes: IrrigaRural e Senninger.

19.5.2 Pivô central

O sistema de irrigação por pivô central tem baixo custo operacional em relação à aspersão convencional. Suas principais características são a baixa relação potência/área ($\leq 3 \text{ cv ha}^{-1}$), alta uniformidade de distribuição de água e emissores (*sprayers*) de baixa pressão de serviço (4,2 a 14 mca), e a possibilidade de operação automática. Mesmo em operação manual, o pivô central permite que uma pessoa opere vários equipamentos, garantindo um baixo custo de mão de obra.

O sistema é instalado em áreas que possibilitem formar círculos ou semicírculos irrigados, em áreas com declividade até 30%, embora seja mais comum em terrenos com declividade inferior a 20%. O sistema pode ser fixo (ponto central único) ou móvel (rebocável com trator, geralmente com 2-3 pontos de engate) (Figura 7).

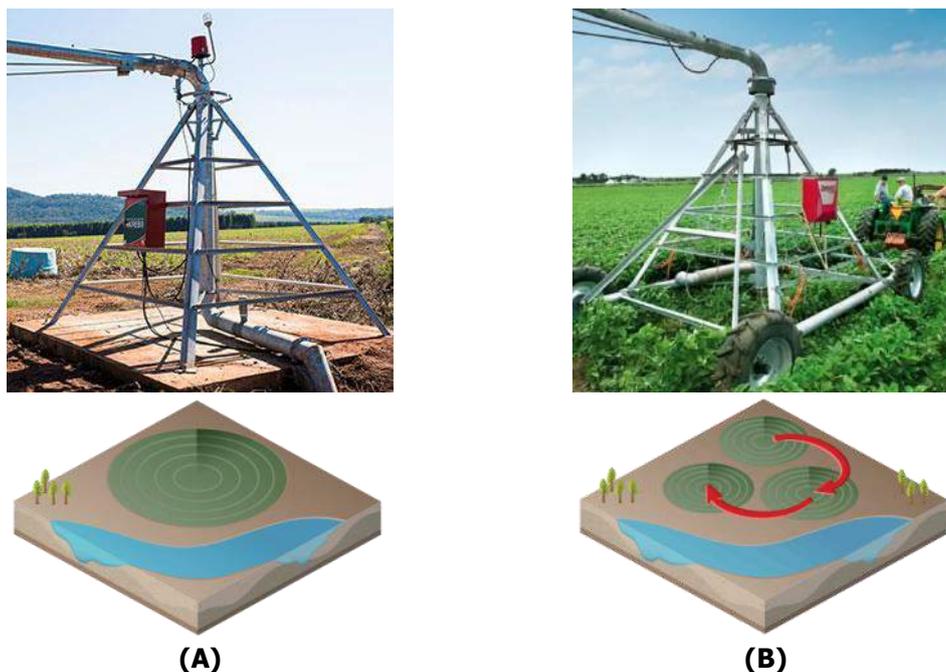


Figura 7. Pivô central com base fixa (A) e rebocável (B). Fontes: Lindsay⁵; Bauer⁶; Krebs⁷.

Além das funções básicas (irrigação e fertirrigação), o pivô central também tem sido usado como suporte para bebedouros e para o sombreamento (Figura 8).

As funções adicionais melhoram as condições de bem-estar animal, contribuem para o aumento da produtividade animal e são um forte apelo junto ao consumidor brasileiro e aos países importadores de carne e leite.



Figura 8. Bebedouros e tela sombrite instalados na estrutura de uma torre de pivô central (Senninger).

⁵ <https://www.lindsay.com/lam/pt/irrigacao/marcas/zimmatic/produtos/pivos-laterais/pivos-moveis/>

⁶ <https://www.bauer-br.com/pt/produtos/irrigacao/sistemas-pivo>

⁷ <http://krebs.com.br/pivos/>

19.6 Fertirrigação e uso racional de efluentes em pastagens

Um dos maiores desafios para a agropecuária nesta década será o de desenvolver sistemas sustentáveis de produção de alimentos e fibras em quantidade e qualidade suficientes, com mínimo impacto ambiental. Tecnologias que levam à intensificação têm sido empregadas para conseguir aumento de produtividade e melhoria na qualidade de vários produtos agropecuários. A produção bovina vem se beneficiando de tais tecnologias, tais como melhoramento genético e seleção de espécies forrageiras e de animais, pastejo rotacionado, adubação por balanço de massa, implantação de áreas fertirrigadas e qualificação de mão de obra.

Ao implantar projetos de irrigação de pastagens, é importante incluir a fertirrigação. Entende-se por fertirrigação a técnica de adubação que utiliza a água de irrigação para levar nutrientes ao solo cultivado, provenientes de fertilizantes químicos ou efluentes líquidos diluídos. Quando se trabalha com efluentes, deve-se assegurar que não possuem elementos químicos que possam causar contaminação no meio ambiente.

Essa técnica tem as seguintes vantagens: maior parcelamento da adubação ao longo do ano; redução custo de mão de obra e uso de máquinas; redução do tempo para os nutrientes chegarem à zona radicular e conseqüente maior eficiência no uso de fertilizantes; possibilidade de utilizar o sistema de fertirrigação para aplicação de produtos (inseticidas e fungicidas de controle biológico, inoculantes etc.). Observa-se, porém, que a uniformidade de distribuição dos nutrientes está atrelada à a uniformidade de aplicação de água pelo equipamento de irrigação.

Os fertilizantes a serem utilizados devem apresentar boa solubilidade. O nitrogênio, o fósforo e o potássio são os nutrientes mais aplicados em sistemas de fertirrigação, mas qualquer elemento químico de interesse pode ser aplicado via fertirrigação.

Os equipamentos para fertirrigação dependem de cada projeto, mas a composição básica inclui turbina de ar (mecanismo de homogeneização), duas (02) caixas de 4 a 5 m³, motobomba injetora e medidor volumétrico (Figura 9).



Figura 9. Vista geral do sistema de fertirrigação composto por turbina de ar para homogeneização da solução, caixas para diluição, motobomba injetora e medidor volumétrico.

É importante fazer o monitoramento da solução do solo, que permite realizar alterações rápidas nas quantidades de nutrientes aplicados, se necessário. Dentre os equipamentos de monitoramento da concentração de elementos químicos no solo,

destacam-se os extratores de solução de solo, compostos por tubos de PVC soldável de 1/2", cápsula de cerâmica porosa de 3/4", borrachas de vedação em silicone e tampão de proteção. Com o auxílio de uma bomba de vácuo é possível coletar amostras da solução de solo e realizar as análises pertinentes ao manejo da fertilidade do solo e da fertirrigação (ANDRADE; DRUMOND, 2012; MELO *et al.*, 2020).

Outro ponto importante é que a fertirrigação permite aplicar efluentes diluídos na água de irrigação, propiciando o reúso (fertirrigação com águas residuárias). O termo reúso é usado para descrever a reutilização da água e segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2014), o reúso da água é a utilização dessa substância por mais de uma vez. Tal fenômeno ocorre espontaneamente na própria natureza, no ciclo hidrológico ou através da ação humana, de forma planejada. O reúso planejado da água pode ser feito para irrigação de várias culturas, recarga de lençol freático, geração de energia, reabilitação de copos d'água e industrial. Portanto, o reúso pode ser uma contribuição significativa para economia de água no planeta.

Estudos comprovam que a aplicação de águas residuárias tem potencial para promover melhoria nas propriedades físicas, biológicas e químicas do solo. Portanto, sua utilização pode favorecer tanto o produtor quanto o meio ambiente. O tratamento biológico avançado é de extrema complexidade e alto custo operacional. Já a disposição final da água residuária por fertirrigação é mais segura, mais simples operacionalmente e tem custo operacional desprezível quando comparado aos processos biológicos.

O reúso também pode ajudar em situações de crise hídrica. As projeções de crescimento das demandas futuras por água feitas em pesquisas mostram que a demanda hídrica no Brasil em 2050 será 55% maior (AYARS *et al.*, 2015), indicando uma condição de escassez iminente em várias bacias hidrográficas.

Quando se trabalha com reúso em fertirrigação, deve-se fazer uma análise química, física e biológica do efluente a ser aplicado na fertirrigação. Os elementos químicos presentes deverão ser totalmente consumidos como nutrientes para o crescimento e produção das plantas forrageiras. Assim, não haverá residual passível de lixiviação para camadas do solo abaixo da zona radicular, com risco de atingir o lençol freático.

Os maiores benefícios desta prática são o menor risco de eutrofização dos recursos hídricos destinados ao consumo humano, a garantia da disponibilidade permanente de água para a produção agrícola e a economia de fertilizantes químicos.

Gentil *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre fertirrigação de pastagem usando efluente de graxaria nas condições climáticas de Rio Paranaíba-MG (Altitude 1.100 m), e concluíram que as aplicações dessa água residuária contribuíram com aumento na produção de matéria seca do Capim Vaquero, chegando a 45 t/ha.ano de MS. Os teores de nitrato ficaram abaixo do nível crítico de contaminação das águas, e os teores fósforo total e nitrogênio total no solo e no lixiviado não representaram riscos de contaminação de solo ou de águas subsuperficiais, evidenciando o potencial do uso desse efluente em fertirrigação de pastagens.

Uma preocupação quando se trabalha com pastagem fertirrigada é a vida do solo (qualidade biológica). Gouvêa *et al.* (2015) avaliaram o efeito da fertirrigação com água residuária de agroindústria sobre a atividade microbiana de um solo sob pastagem, por meio da taxa de respiração, da biomassa microbiana, do carbono orgânico total do solo e do quociente metabólico e microbiano. Não foi observado efeito nocivo da aplicação da água residuária agroindustrial sobre a atividade microbiana nas diferentes profundidades do solo dessa pastagem. Não foram detectadas diferenças significativas da atividade microbiana entre áreas de pastagem fertirrigada com esse efluente e de

pastagem fertirrigada com água e adubo químico equivalente ao efluente em elementos químicos, evidenciando que a água residuária não provocou impacto negativo sobre a microbiota do solo.

19.7 Produção intensiva de volumoso para confinamento

Com implantação de projetos fertirrigados em pastagens e o aumento do número de confinamentos no Brasil, cresceu o interesse de técnicos de produtores para a produção de volumoso de capim, por ter boa qualidade nutricional e menor custo que as alternativas (silagem de milho, cana etc.). A produtividade de forragem é alta e a técnica de ensilagem dessas forrageiras é dominada por técnicos consultores e equipes das propriedades rurais. As forrageiras do gênero *Panicum* são as mais ensiladas (Ex.: Mombaça, Zuri e Paredão). O custo de produção de uma tonelada de silagem desses capins fertirrigados com adubo químico está em torno de 40% do custo de produção de silagem de milho. Quando se utiliza efluentes na fertirrigação, esse custo é reduzido e pode chegar a 20-30% do custo de produção da silagem de milho, considerando a mesma condição de produção.

Para conseguir altas produtividades de silagens dessas forragens é necessário que a irrigação, a adubação e o manejo sejam estabelecidos de acordo com o potencial de produção para a região do projeto. Em áreas irrigadas, o maior problema é em relação à adubação.

De forma geral, as recomendações de adubação de pastagens no Brasil têm sido baseadas em boletins de recomendações de calagem e adubação para diversas culturas, publicadas por instituições de pesquisa. Os mais utilizados são o Boletim 100 (VAN RAIJ *et al.*, 1996) e a 5ª aproximação (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 1999), que se baseiam nos critérios de classes de fertilidade do solo e níveis tecnológicos para sugerir os níveis de adubação. Entretanto, tal abordagem pode não ser a mais adequada em sistemas de produção intensiva.

Drumond e Aguiar (2005) observam que muitos avanços têm ocorrido em termos de adubação de pastagens, especialmente em sistemas mais tecnificados, tais como em pastagens irrigadas. Vários trabalhos têm questionado o uso dos boletins citados para a recomendação de adubação em sistemas de produção intensiva bovina, propondo modelos matemáticos de predição, tais como o Balanço de Massa e o Modelo Dinâmico. As vantagens desses modelos são: possibilidade de se fazer balanços nutricionais para produtividades específicas, considerando a complexidade da dinâmica dos nutrientes na pastagem (principalmente devido à ação dos animais); e a associação das adubações à evolução do sistema produtivo.

Os modelos dinâmicos são modelos mecanicistas (ou de processos) e situam-se na área de modelagem matemática, uma área da análise de sistemas. Esses modelos compilam praticamente todos os processos que ocorrem no sistema solo-planta-animal, por meio de sistemas computacionais com centenas de equações. Esses modelos têm grande poder de previsão e simulação do sistema produtivo, por isso, seu uso tem crescido em áreas comerciais de produção altamente tecnificada. Exemplos de modelos são o APSIM e o GRAZPLAN/AUSFARM, desenvolvidos na Austrália, o CROPGRO/DSSAT desenvolvido nos Estados Unidos e o PASIM desenvolvido na União Europeia. A limitação desses modelos é a necessidade de parametrização nas condições brasileiras e a exigência de muitos dados de entrada, que incluem características físicas e químicas do solo, manejo vegetal e dados meteorológicos.

O Método do Balanço de Massa permite a realização do balanço nutricional considerando muitos processos e exige menor quantidade de informação, podendo ser

utilizado no Brasil por meio de cálculos que proporcionam bons resultados com reduzida margem de erro (ANDRADE; DRUMOND, 2012).

Nesse modelo considera-se a produção anual de forragem desejada, a eficiência de colheita, os índices de ciclagem via fezes e urina (quando em pastejo), incluindo taxas de decomposição e distribuição do material na área, os índices de colheita (sistemas de corte de forragem), índices de ciclagem da forragem não colhida (material morto oriundo do resíduo, senescência, acamamento, material coletado e não ingerido, etc.) e os índices de eficiência dos nutrientes em formas orgânicas (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 1994; DRUMOND; AGUIAR, 2005; AGUIAR, 2011; DUBEUX JR. *et al.*, 2011; ANDRADE; DRUMOND, 2012).

Para que não ocorra empobrecimento do solo e se consiga manter o nível alto de produção da forrageira, é necessário repor ao solo as quantidades de nutrientes retirados e matéria orgânica. Deve-se levar em consideração a dinâmica na pastagem, pela ação dos animais sobre a reciclagem da planta, contabilizar a massa de cada nutriente nos componentes solo-planta-animal, as variáveis de acréscimos e perdas. Ao final desse processo, gera-se uma estimativa da quantidade necessária de acréscimo de cada elemento químico (adubação). A reposição desses elementos tem que vir da adubação química e/ou do uso de biofertilizantes (efluentes). O Método do Balanço de Massa é indicado por considerar a interação entre componentes do sistema e prever alterações no fluxo de nutrientes à medida que fatores de produção são modificados por meio do manejo.

Em trabalho realizado por Melo *et al.* (2019), os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu e Zn estimados pelo conjunto de resultados, de forma ponderada, de efluentes de confinamento bovino foram: 669,5 mg/L de N; 102,3 mg/L de P; 580,4 mg/L de K; 97,3 mg/L de Ca; 90,5 mg/L de Mg; 12,3 mg/L de S; 0,02 mg/L de Cu e 0,01 mg/L de Zn. Tais valores apontam a capacidade de reposição de nutrientes no solo com reúso, pois cada 100 m³ desse efluente contém, aproximadamente, 68 kg de N; 10,5 kg de P; 59 kg de K; 10 kg de Ca; 9 kg de Mg; 1,2 kg de S; 0,002 kg de Cu e 0,001 kg de Zn por dia, evidenciando o potencial de adubação com esse efluente.

Os custos de produção devem merecer especial atenção em projetos de fertirrigação de pastagens, pois determinam as ações de técnicos e produtores no planejamento da atividade pecuária. As Tabelas 4 e 5 contêm o resumo dos principais custos de produção, tanto para recria/engorda em condição de pasto fertirrigado, quanto para produção de silagem de capim.

A utilização de efluentes na fertirrigação diminui sensivelmente o custo da arroba produzida. Efluentes de bovinocultura e suinocultura são mais estáveis que efluentes da agroindústria, pelas variações que normalmente ocorrem dentro do processamento industrial.

Nesses sistemas intensivos com fertirrigação com adubação química, o custo da arroba produzida é em torno de 31 dólares. Quando se utiliza água residuária de bovinos e suínos na fertirrigação, o custo da arroba produzida é cerca de 15 dólares, uma redução da ordem de 50% no custo de produção da arroba.

A redução do custo de produção de volumoso resulta em redução do custo total de produção em confinamentos de machos, fêmeas (novilhas) e vacas com bezerros, beneficiando produtores que incorporam tal tecnologia. Vêm crescendo no país o número de confinamentos de vacas para produção de bezerros (Figuras 10 e 11), sistema em que é possível desmamar um bezerro entre 7 a 8 meses de vida com 270 a 300 kg de peso vivo e custo de produção entre 200 e 250 dólares.

Tabela 4. Custos de produção em condição de pastagem fertirrigada para recria/engorda com adubação química, sem suplementação energética dos animais.

CUSTOS FIXOS	%
Equipamento de irrigação	7,50
Cerca elétrica e convencional	0,50
Implantação da pastagem (sementes, fertilizantes, etc.)	0,60
Manejo de animais e equipamentos manejo da irrigação	0,20
Rede de água	0,20
Outros (mão de obra para instalação)	0,20
Total Custos Fixos	9,20
CUSTOS OPERACIONAIS	%
Fertilizantes	46,40
Energia elétrica	19,50
Calagem (com operação)	1,50
Manutenção de equipamentos	1,60
Sal mineral	2,00
Mão de obra (1 pessoa)	5,00
Outros (controle de plantas daninhas, pragas e manutenção de cercas)	1,90
Total Custos Variáveis	77,90
OUTROS	%
Juros ao ano sobre o investimento (7%)	11,50
Administração/outros do custo operacional (2%)	1,40
Total Outros	12,90

Tabela 5. Custos de produção em condição de pastagem fertirrigada para recria/engorda com adubação com efluente* e complementação com adubação química, sem suplementação energética dos animais.

CUSTOS FIXOS	%
Equipamento de irrigação	14,50
Cerca elétrica e convencional	1,00
Implantação da pastagem (sementes, fertilizantes, etc.)	1,20
Manejo de animais e equipamentos manejo da irrigação	0,50
Rede de água	0,40
Outros (mão de-obra para instalação)	0,50
Total Custos Fixos	18,10
CUSTOS OPERACIONAIS	%
Fertilizantes	8,20
Energia elétrica	24,20
Calagem (com operação)	3,10
Manutenção de equipamentos	3,00
Sal mineral	5,10
Mão de obra (1 pessoa)	10,00
Outros (controle de plantas daninhas, pragas e manutenção de cercas)	3,90
Total Custos Variáveis	57,50
OUTROS	%
Juros ao ano sobre o investimento (7%)	23,50
Administração/outros do custo operacional (2%)	0,90
Total Outros	24,40

* Foi tomado como base o efluente de confinamento tratado com biodigestor.



Figura 10. Vista geral de um confinamento que utiliza silagem de *Panicum* como volumoso.



Figura 11. Vista geral de um confinamento de vacas para produção de bezerros.

19.8 Manejo racional da irrigação de pastagens

Inicialmente o manejo da irrigação era feito por monitoramento da umidade do solo, da estimativa do consumo de água por meio de dados climáticos ou de sistemas mistos (solo + clima).

No monitoramento via solo, sensores de umidade (sondas TDR - Reflectância no domínio do tempo ou FDR- Reflectância no domínio do tempo, etc.) ou dispositivos de medição do potencial matricial de água no solo (tensiômetros) são instalados para fazer medições em camadas, dentro e abaixo da zona radicular. Com o auxílio de curvas características de retenção de água no solo pode-se determinar a lâmina d'água a ser

reposta para elevar a umidade à máxima capacidade de retenção do solo (capacidade de campo).

No monitoramento via clima utiliza-se estações meteorológicas para medição de temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluvial, radiação solar e fluxo de calor no solo. Esses dados são utilizados em modelos de estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc). A partir das estimativas de ETc e de chuvas, utiliza-se o balanço hídrico de cultura para determinar a lâmina d'água de irrigação que faça a umidade do solo retornar à capacidade de campo.

O sensoriamento remoto e as tecnologias de processamento de imagens possibilitam o desenvolvimento de novos métodos de estimativa de evapotranspiração em dosséis vegetais, tais como: Índice de Balanço de Energia de Superfície – SEBI (CHOUDHURY; MENENTI, 1993), o Sistema de Balanço de Energia de Superfície – SEBS (SU, 2002); Índice de Balanço de Energia de Superfície Simplificado – S-SEBI (ROERINK *et al.*, 2000); Algoritmo de Balanço de Energia de Superfície para Terra – SEBAL (BASTIAANSEN *et al.*, 1998a e 1998b); Mapeamento de Evapotranspiração com Calibração Internalizada – METRIC (ALLEN *et al.*, 2007); e Balanço de Energia de Superfície Simplificado Operacional – SSEBop (SENAY *et al.*, 2013).

Embora facilitem a estimativa da evapotranspiração e o balanço hídrico, os métodos baseados em sensoriamento remoto e imagens de satélite têm limitações similares, tais como a impossibilidade de obtenção de dados em dias nublados, falta de precisão e exatidão em certos parâmetros utilizados nos modelos e carência de informações para certas escalas de mapeamento (TANG *et al.*, 2009). Vários dos métodos citados fazem correções com dados meteorológicos na tentativa de reduzir ou eliminar os problemas citados.

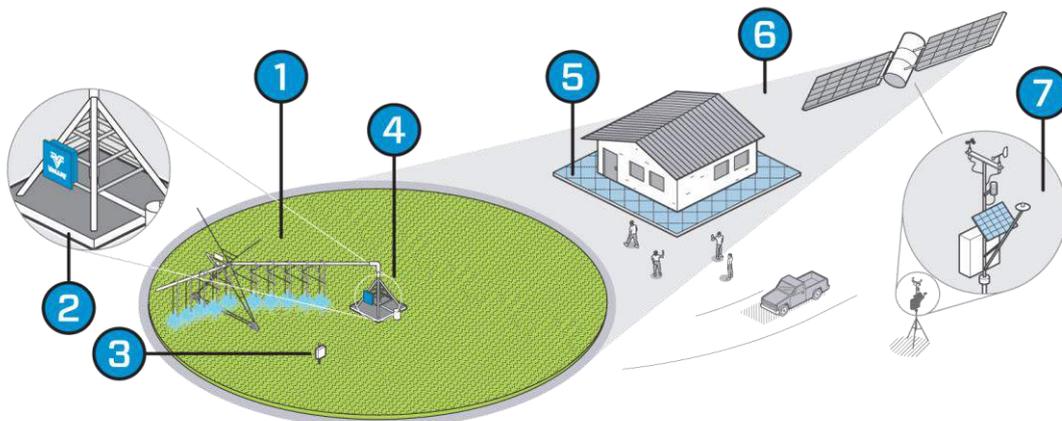


Figura 12. Esquema de um sistema de manejo em sistema de irrigação por pivô central. [1] Informações sobre a propriedade, dados de campo e preferências do proprietário, compilação de dados por softwares e estimativa de necessidade hídrica. [2] Sensoriamento remoto aplicado ao manejo. [3] Sensores de umidade do solo. [4] Equipamento de irrigação (pivô central). [5] Suporte técnico e treinamento contínuo. [6] Controle da irrigação de precisão (taxa variável). [7] Estação meteorológica automática (Irriger/Valley (2020) – <http://www.irriger.com.br/pt-BR>).

A evolução tecnológica e a revolução digital têm disponibilizado novas ferramentas para o manejo da irrigação, tais como sistemas de monitoramento por imagens (satélites e drones), modelos de estimativa de evapotranspiração por imagens, softwares para computadores e aplicativos para smartphones. A junção métodos, equipamentos e técnicas de estimativa e/ou determinação permite melhorias significativas no manejo da irrigação e dos cultivos irrigados.

O processo de tomada de decisão também evoluiu, passando de totalmente local e individual (técnico e/ou equipe da fazenda) para um sistema misto (equipe da fazenda e empresa de monitoramento e assessoria técnica). Um exemplo desse tipo de sistema de manejo e assessoria técnica é apresentado na Figura 12. O trabalho envolve a disponibilização de hardware (estação meteorológica, sensores, sistema de transmissão e central de armazenamento de dados), software (operação de equipamentos de campo, coleta, transmissão e processamento de dados, sistemas de alerta meteorológico e orientação para o manejo da irrigação) e assistência técnica (visitas de campo e reuniões para discussão e ajustes).

O sistema apresentado neste exemplo inclui: (i) visitas presenciais de implantação e acompanhamento; (ii) teste de campo para levantamento de características físico-hídricas; (iii) configuração de plataforma de manejo e treinamento de equipe da fazenda; (iv) auditoria online quinzenal utilizando a plataforma de manejo; (v) envio e disponibilização automática de dados climáticos; (vi) relatórios periódicos mensais de consumo de energia e da safra; (vii) sensoriamento remoto (Imagens NDVI⁸, ocorrência e intensidade de *deficit*); (viii) aplicativos para celular (monitoramento, alertas etc.); e (ix) previsão climática para os próximos 7 dias (ETc, chuvas, geada e graus-dia).

19.9 Perspectivas e tendências futuras de irrigação de pastagem

O avanço da tecnologia e inovação da Indústria 4.0 tem influenciado a modernização do setor agrícola. Sensores, softwares, Big Data, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial (AI) estão entre as tecnologias que têm ganhado espaço nas atividades agrícolas, caracterizando o que se tem chamado de "Agricultura 4.0".

O uso das tecnologias digitais na agricultura possibilita a realização e o acompanhamento de processos de forma mais eficiente, garantindo precisão nas mais diversas ações. Na irrigação, a tecnologia favorece o gerenciamento inteligente e sustentável da água, garantindo informações precisas referentes ao momento (quando) e à lâmina d'água (quanto) de irrigação.

Assim, nasceu um novo conceito na agricultura irrigada: "Irrigação de precisão", que consiste no gerenciamento da variabilidade da disponibilidade hídrica no campo por meio de ferramentas da tecnologia digital, otimizando o manejo da irrigação. Imagens de satélite aliadas contendo as bandas espectrais adequadas, aliadas a sistemas de monitoramento inteligente em campo, geram dados referentes ao solo, à lavoura e ao clima. Devidamente processados, esses dados resultam em informações técnicas que facilitam a tomada de decisão do produtor irrigante.

Empresas líderes do setor têm investimentos crescentes em soluções inteligentes para o gerenciamento da irrigação e em equipamentos mais eficientes, alcançando bons resultados. Entre os produtos já lançados no mercado estão: (i) plataformas intuitivas para o gerenciamento da irrigação e da fertirrigação; (ii) ferramentas que possibilitam ligar e desligar um sistema de irrigação de forma remota; e (iii) softwares que permitem ao produtor monitorar e gerenciar a irrigação a partir de smartphones.

Além das citadas, há iniciativas de associar fontes renováveis de energia a sistemas de irrigação, o que agrega mais sustentabilidade à agricultura irrigada. Alguns exemplos recentes são pivôs com fonte de energia solar fotovoltaica e sistemas híbridos de energia (diesel + solar fotovoltaica, ou rede elétrica nacional + solar fotovoltaica).

⁸ Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.

19.10 Considerações finais

A tecnologia digital traz uma nova força à agricultura irrigada. Ao associar inovação ao manejo agrônômico, o manejo da irrigação no contexto da agricultura 4.0 possibilita maior assertividade na tomada de decisão, promovendo o uso racional da água, a redução de custos e aumentos de produtividade e rentabilidade.

A evolução dos sistemas de irrigação fez com que eles passassem de meros equipamentos mecânicos de aplicação de água a sistemas interativos, com tendência a uma crescente autonomia e a uma possível transformação em robôs.

Os sistemas de irrigação tendem a evoluir para sistemas multi-tarefa, executando funções como irrigação, nutrição, quimificação, bioirrigação, monitoramento de cultivos e animais (câmeras comuns e/ou sensores multiespectrais) e câmeras de vigilância (furtos, incêndios, entre outros), controle de pragas e doenças, sombreamento e fornecimento de água aos animais.

Em síntese, na Agricultura 4.0, todo equipamento que vai ao campo, ou que está sempre nele, deve gerar informações para suporte a decisões e colaborar na realização das tarefas relativas às decisões tomadas.

Referências

- AGUIAR, A.P.A. **Correção e adubação do solo da pastagem**. Uberaba: A.P.A. AGUIAR, 244p., 2011.
- ALLEN, R.G.; TASUUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, 2007.
- ANDRADE, A.S.; DRUMOND, L.C.D. Adubação de pastagens irrigadas: princípios e recomendações. **Revista Cerrado Agrociências**, 2012.
- ARAUJO, L.C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, R.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; CRUZ, P.G. Simulating Guinea grass production: empirical and mechanistic approaches. **Agronomy Journal**, Madison, v.105, p.61-69, 2013.
- AYARS, J.E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California-Here to stay? **Agricultural Water Management**, vol.157, issue C, p.39-47, 2015.
- BANCO DE DADOS CLIMÁTICOS DO BRASIL. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/>. Acesso em: 4 nov. 2013.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v.212 - 213, p.198-212, 1998a.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. **Journal of Hydrology**, Wageningen, v.212-213, p.213-229, 1998b.
- BERTOLETE, L.E.M. **Sobre semeadura de forrageiras de clima temperado em pastagens tropicais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia de Botucatu, 84p., 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/104139>. Acesso em: 4 nov. 2013.
- BAUER. Disponível em: <https://www.bauer-br.com/pt/produtos/irrigacao/sistemas-pivo>. Acesso em: 30 abr. 2021.
- BISCARO, G.A. **Sistemas de irrigação por aspersão**. Dourados: Editora da UFGD, 134p., 2009.

- CHOUDHURY, B.J.; MENENTI, M. **Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range.** Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra): London, v.212, p.561-568, 1993.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** Passo Fundo, SBCS - Núcleo Regional Sul, 224p., 1994.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais.** 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 359p., 1999.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Água de Reúso** - Modelos de Comercialização. SABESP. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/ap_sabesp_div_grand_cons_leste.pdf. Acesso em: 20 nov. 2014.
- CRUZ, P.G.; SANTOS, P.M.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; ARAUJO, L.C. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.7, p.675-681, 2011.
- DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: III. Modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.58-61, 1998a.
- DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.46-50, 1998b.
- DRUMOND, L.C.D.; AGUIAR, A.P.A. **Irrigação de Pastagem.** Uberaba, 210p., 2005.
- DUBEUX JR., J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M.A.; MELLO, A.C.L.; SILVA, H.M.S.; LIRA, C.C. A ciclagem de nutrientes no contexto do manejo das pastagens. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 8., Lavras, 2011. **Anais**, Lavras: UFLA. 196p., p.79-98, 2011.
- FITZPATRICK, E.A.; NIX, H.A. The climatic factor in Australian grassland ecology. In: MOORE, R.M. (Ed.). **Australian grasslands.** Canberra: Australian National University Presschap, v.1, p.3-36, 1973.
- FONTANELI, R.S.; MEINERZ, G.R.; SANTOS, H.P.; BIAZUS, V.; FAVERO, D.; REBECHI, I.D.A. A contribuição das forrageiras de inverno para a pecuária de leite. In: VILELA, D.; FERREIRA, R.P.; FERNANDES, E.N.; JUNTOLLI, F.V. (Ed.). **Pecuária de leite no Brasil: cenários e avanços tecnológicos.** Brasília: Embrapa, p.239-253., 2016.
- GENTIL, F.H.; DRUMOND, L.C.D.; CARVALHO, A.M.X. **Lixiviação de nutrientes e alteração de propriedades químicas do solo submetido a aplicação de água residuária de graxaria.** 25p., 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Produção Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa. Rio Paranaíba: UFV, 2016.
- GOUVÊA, M.M.; PEREIRA, M.C.; DRUMOND, L.C.D. **Efeito da fertirrigação com água residuária de agroindústria sobre a atividade microbiana de um solo sob pastagem.** 23p., 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba: UFV, 2015.
- GRABLE, A.R. The future of applied plant growth modeling. In: WISIOL, K.; HESKETH, J.D. (Ed.). **Plant growth modeling for resource management: current models and methods.** Boca Raton: CRC Press, p.141-156, 1987.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of Agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.137-157, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário, Rio de Janeiro, IBGE, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9827-censo-agropecuaria.html?=&t=o-que-e>. Acesso em 20 jul. 2019.

IRRIGER/VALLEY. 2020. Disponível em: <http://www.irriger.com.br/pt-BR>. Acesso em 30 abr. 2021.

KREBS. Disponível em: <http://krebs.com.br/pivos/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

LARA, M.A.S. **Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de *Brachiaria* spp. às variações estacionais da temperatura do ar e do fotoperíodo**, 91p., 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LINDSAY. Disponível em:

<https://www.lindsay.com/lam/pt/irrigacao/marcas/zimmatic/produtos/pivos-laterais/pivos-moveis/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

MELO, C.C.F.; DRUMOND, L.C.D.; CARVALHO FILHO, A. **Fertirrigação de pastagem com efluente de bovinocultura e interações com o sistema solo-planta**. 43p., 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Gráfica UFV VII, UFV CRP, 2019.

MELO, M.C.; GUIMARÃES, L.M.; SILVA, P.L.; CAMARGO, D.D.; DRUMOND, L.C.D. Crescimento e produtividade de *Brachiaria* adubada e irrigada por gotejamento subsuperficial. **Irriga**, v.25, p.10-27, 2020.

MENDONÇA, F.; RASSINI, J. Temperatura-base inferior e estacionalidade de produção de gramíneas forrageiras tropicais. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, **Circular técnica**, 459p., 2006.

MENDONÇA, F.C. **Irrigação de pastagens: Pesquisa, desenvolvimento tecnológico e transferência de tecnologia**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

OLIVEIRA, P.P.A.; PRIMAVESI, A.C.; CAMARGO, A.C.; RIBEIRO, W.M.; SILVA, E.T.M. Recomendação da sobressemeadura de aveia em pastagens tropicais ou subtropicais irrigadas. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste. **Comunicado Técnico** 61, 2005.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 440p., 1981.

PEZZOPANE, J.R.M.; SANTOS, P.M.; MENDONÇA, F.C.; ARAUJO, L.C.; CRUZ, P.G. Dry matter production of Tanzania grass as a function of agrometeorological variables. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, p.471-477, 2012.

POSTIGLIONI, S.R. Comportamento da aveia, azevém e centeio na região dos Campos Gerais, PR. Londrina, IAPAR, **Boletim técnico**, n.14, 18p., 1982.

RICHTER, L.A. Irrigação de pastagens. In: FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. (Ed.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região Sul-Brasileira**. 2. Ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p.487-507, 2012. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/li/li01-forrageiras/cap17.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2020.

RODRIGUES, D.A.; AVANZA, M.F.B.; DIAS, L.G.G.G. Sobressemeadura de aveia e azevém em pastagens tropicais no inverno: revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, Garça, v.9, n.16, 2011.

RODRIGUES, D.C. **Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich) Staf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas**, 94p., 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ROERINK, G.J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans and Atmosphere**, v.25, n.2, p.147-157, 2000.

- SENAY, G.B.; KAGONE, S.; SINGH, R.K.; GOWDA, P.H. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. **Journal of the American Water Resources Association**, v.49, n.3, p.577-591, 2013.
- SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Wageningen, v.1, n.6, p.85-99, 2002.
- TANG, Q.; GAO, H.; LU, H.; LETTENMAIER, D.P. **Remote Sensing: Hydrology**. Progress in Physical Geography, Seattle, v.4, n.33, p.490-509, 2009.
- TEH, C. **Introduction to mathematical modeling of crop growth**: how the equations derived and assembled into a computer model. Boca Raton: Brown Walker Press, 256p., 2006.
- THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling**: a mathematical approach to plant and crop physiology. Caldwell: The Blackburn Press, 669p., 1990.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p., 1955.
- TONATO, F.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, p.522-529, 2010.
- VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim Técnico**, 100. Campinas: IAC, 285p., 1996.
- VILLA NOVA, N.A.; CARRETERO, M.V.; SCADUA, R.A. Um modelo de avaliação do crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, Campinas. **Anais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p.31-48, 1983.
- YARS, J.E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agriculture Water Management**, v.157, p.39-47, 2020.

CAPÍTULO 20

20 IRRIGAÇÃO DO CAFEIEIRO

André Luís Teixeira Fernandes e Eusímio Felisbino Fraga Júnior

Resumo

A cafeicultura brasileira apresenta grande importância na geração de empregos, recursos e divisas, em várias regiões brasileiras, em sua maioria, com cultivo em condições de sequeiro. Porém, nos últimos anos, tem se observado que a irrigação é cada dia mais usada pelos cafeicultores brasileiros, principalmente nas regiões onde o *deficit* hídrico é mais pronunciado. Hoje, o parque cafeeiro irrigado já conta com 450 mil hectares. O aumento do interesse pelos cafeicultores à irrigação é devido a vários fatores, dentre os quais se destacam: a expansão da cafeicultura para novas fronteiras; a evolução da técnica da irrigação; a diminuição dos custos dos sistemas de irrigação e a mentalidade do cafeicultor no sistema de produção café, priorizando a eficiência e a qualidade da produção. Existem diferentes sistemas de irrigação que podem ser utilizados, sendo que a escolha do mais adequado depende de uma série de fatores, destacando-se o tipo de solo, a topografia, o tamanho da área, os fatores climáticos, os fatores relacionados ao manejo da cultura, o *deficit* hídrico, a capacidade de investimento do produtor e o custo do sistema de irrigação. A determinação da época da irrigação e da quantidade de água a ser aplicada pode ser feita com o monitoramento da planta, do solo ou do clima. A cafeicultura brasileira é uma das mais tecnologicamente desenvolvidas do mundo, pois alia altas produtividades à excelente qualidade do café produzido. Esta superioridade é alcançada devido ao clima favorável, mecanização em, praticamente, todas as etapas de produção, irrigação e modernas práticas fitossanitárias, culturais e nutricionais.

20.1 Introdução

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo (LOFTFIELD *et al.*, 2018). Segundo Tverdal *et al.* (2020), globalmente o café é a bebida estimulante mais frequentemente consumida e, provavelmente, é a mais segura do ponto de vista alimentar. DaMatta (2004) comenta que o café é uma das mais importantes *commodities* na agricultura internacional e representa significativa fonte de recursos para países latino-americanos, africanos e asiáticos.

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e em breve será também o maior consumidor. A área plantada com a cultura de café em 2019 (espécies arábica e robusta) no país totaliza 2,16 milhões hectares, equivalente à cultivada em 2018. Desse total, 319,72 mil hectares (14,8%) estão em formação e 1,84 milhão de hectares (85,2%) em produção (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019).

A cafeicultura brasileira apresenta grande importância na geração de empregos, recursos e divisas, sendo bastante diversificada, com particularidades regionais. O Cerrado brasileiro abrange mais de 200 milhões de hectares, distribuídos nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Bahia, Piauí, Maranhão e Distrito Federal, e tem se destacado com produção superior a 5 milhões de sacas por ano, principalmente de *Coffea arabica* L. A cafeicultura, nesta região, é caracterizada por apresentar produtividade acima da média nacional e utilizar, de

maneira mais eficiente, insumos agrícolas, irrigação, genótipos apropriados e mecanização, dentre outras práticas.

A expansão da cafeicultura no país foi alavanca na década de 1970 com a elaboração do zoneamento climático para os cafés arábica e robusta, realizado por pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Este trabalho determinou áreas com melhores condições de temperatura e disponibilidade de água, restringindo áreas mais sujeitas à geada ou com deficiências hídricas, das quais no final da década de 80 passaram a ser cultivadas mediante a irrigação, de forma que a irrigação não é uma prática recomendada extensivamente para regiões zoneadas como climaticamente aptas à cafeicultura. No entanto, essas regiões sofrem com o efeito das estiagens prolongadas nos períodos críticos de demanda de água pelo cafeeiro, promovendo queda de produção e de qualidade, indicando a necessidade e a viabilidade da adoção da prática da irrigação.

De acordo com Nikolskii *et al.* (2019), a irrigação aumenta a produtividade agrícola e afeta inevitavelmente as propriedades do solo. Quando a água de irrigação é de boa qualidade e não causa salinidade, sodicidade ou contaminação do solo, e quando não há erosão do solo, espera-se, como regra geral, um aumento gradual da fertilidade do solo sob condições de irrigação.

O aumento de produtividade é resultado dos incrementos tecnológicos adotados pelos produtores desde 1984, principalmente nas chamadas novas fronteiras do café, aumentando o uso da mecanização, o desenvolvimento de novas variedades e também a adoção de técnicas de irrigação (VOLSI *et al.*, 2019).

Especificamente para café, a irrigação tem proporcionado resultados altamente positivos na produtividade das lavouras, seja nas já existentes, recuperando-as de 10 a 15 para 30 a 35 sacas por hectare, seja nas novas, com média de 45 a 55 sacas anuais por hectare (SANTINATO *et al.*, 2008). Desta forma, tem sido observado que a irrigação é cada dia mais usada pelos cafeicultores do Cerrado e do Brasil.

20.2 Cafeicultura irrigada

A irrigação do cafeeiro tem recebido grande destaque nos últimos anos, sendo tal interesse devido a vários fatores, dentre os quais se destacam: a expansão da cafeicultura para novas fronteiras; a evolução da técnica da irrigação; a diminuição dos custos dos sistemas de irrigação e a mentalidade do cafeicultor no sistema de produção café, priorizando a eficiência e a qualidade da produção (MANTOVANI; SOARES, 2003; SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2008; SANTINATO; FERNANDES, 2012; FERNANDES *et al.*, 2012; GARCIA *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2018; HO *et al.*, 2018; FERNANDES *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2019; VICENTE *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2020). No Brasil, 449.282,8 ha já são irrigados por diferentes sistemas, sendo estes distribuídos nas diferentes regiões cafeeiras do País, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Áreas irrigadas nas principais regiões cafeeiras do Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2020; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Cultivo de café	Área Total (ha)	Área Irrigada (ha)	% Irrigada
Brasil	1.927.356,0	449.282,8	23,3
Acre	1.047,0	0,0	0,0
Alagoas	0,0	0,0	0,0
Amazonas	4.622,0	0,0	0,0
Bahia	124.500,0	45.753,6	36,7
Ceará	1.447,0	0,0	0,0
Distrito Federal	410,0	293,5	71,6
Espírito Santo	384.828,0	207.741,5	54,0
Goiás	7.470,0	7.460,1	99,9
Maranhão	0,0	0,0	0,0
Minas Gerais	1.054.911,0	134.183,1	12,7
Mato Grosso do Sul	258,0	0,0	0,0
Mato Grosso	11.814,0	1.025,0	8,7
Pará	257,0	0,0	0,0
Paraíba	0,0	0,0	0,0
Pernambuco	1.326,0	0,0	0,0
Piauí	0,0	0,0	0,0
Paraná	35.700,0	143,0	0,4
Rio de Janeiro	12.892,0	263,0	2,0
Rio Grande do Norte	0,0	0,0	0,0
Rondônia	72.189,0	43.238,0	59,9
Roraima	0,0	0,0	0,0
Rio Grande do Sul	0,0	0,0	0,0
Santa Catarina	0,0	0,0	0,0
Sergipe	0,0	0,0	0,0
São Paulo	213.685,0	8.782,0	4,1
Tocantins	0,0	0,0	0,0

20.3 Investimentos na irrigação do cafeeiro

Para produzir café, são necessários 30 meses de intenso trabalho de preparo de solo, correção de solo, plantio, tratos culturais, fitossanitários e nutricionais etc., até que seja possível colher a primeira safra. Nestes 30 meses, são gastos em torno de R\$ 25.000,00 por hectare. Porém, se houver problema de falta de água numa fase fenológica crítica, como floração e granação, a safra pendente pode ser muito prejudicada. Aí, todo o investimento fica comprometido. Dependendo do ano e do *deficit* hídrico, o cafeeiro tem prejuízos tão altos que compromete as próximas safras, às vezes promovendo o abandono do cafeeiro da atividade.

A alternativa mais viável para reduzir estes riscos é a irrigação, pois possibilita que a maior causa de queda de produtividade do café seja abolida, conforme Figura 3. Na Figura 1, podemos ver que as principais causas de quebra de produtividade na lavoura cafeeira são decorrentes da falta de chuva ou irrigação (56%) ou do excesso hídrico (17%), o que explica o expressivo aumento nas áreas irrigadas de café no Brasil.

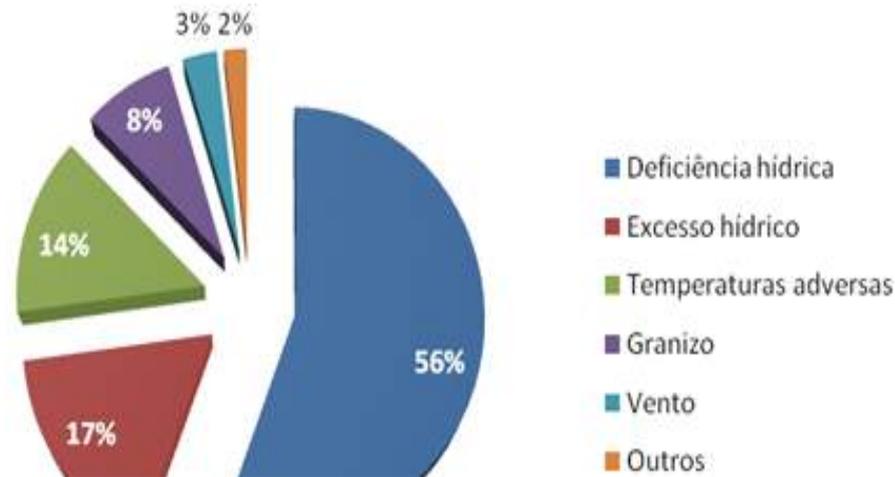


Figura 1. Principais causas de quebra de produtividade na cafeicultura (RODRIGUES *et al.*, 2014).

Os cafezais irrigados estão mais concentrados nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Goiás e, em menor proporção, em Mato Grosso, Rondônia, São Paulo e Paraná. A irrigação tem sido utilizada mesmo nas regiões consideradas tradicionais para o cafeeiro, como o sul de Minas Gerais, Zona da Mata de Minas Gerais, Mogiana Paulista, Espírito Santo, com resultados excepcionais de produtividade.

Trabalhos de pesquisa desenvolvidos nas regiões de Lavras e Viçosa, em Minas Gerais, consideradas aptas climaticamente ao cultivo do cafeeiro, sem a necessidade de irrigação, demonstram que o aumento de produtividade média com o uso da irrigação (médias de pelos menos três safras) tem sido de 50%, quando comparada com as lavouras de sequeiro.

É importante salientar que, embora a irrigação seja viável nestas regiões, o benefício do uso desta tecnologia é mais evidente em regiões mais quentes, onde a temperatura média mensal dificilmente fica abaixo dos 19° C, como as novas fronteiras do café - Barreiras, Luiz Eduardo Magalhães e Cocos, na Bahia.

Na Tabela 2, é possível verificar a divisão da cafeicultura brasileira em regiões, de acordo com a temperatura. As regiões podem ser classificadas em "frias", "médias" e quentes. A irrigação tem proporcionado melhores resultados de produtividade nas regiões quentes, seguido pelas médias e, por último, nas frias.

Especificamente na região do Triângulo Mineiro (área do cerrado de Minas Gerais), a definição das estações climáticas, com verão quente e úmido e inverno ameno e seco (condições importantes para a produção de excelente qualidade de café), constitui-se no grande trunfo do Cerrado. Esta condição climática ocorre pelo fato de o Cerrado estar em área continental, o que possibilita padrões de chuva diferentes dos que ocorrem em outras regiões produtoras de café, no Brasil, que sofrem influência direta das massas oceânicas (FERNANDES *et al.*, 2012). As médias de produtividade do café do Cerrado ficam entre as maiores do Brasil, especialmente quando se utiliza a irrigação (em 2018, a produtividade das áreas de cerrado do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba foi de 37,73 sacas beneficiadas/hectare, superior à média brasileira, de 31,72 sacas).

Vários experimentos têm sido conduzidos nas diferentes regiões cafeeiras, objetivando, principalmente, avaliar o efeito da irrigação na produtividade e qualidade do cafeeiro, sendo vários deles relacionados ao impacto da imposição de estresse hídrico na produtividade/qualidade do café.

Tabela 2. Classificação das regiões cafeeiras do Brasil de acordo com as temperaturas médias mensais.

Classificação das regiões	Temperatura média mensal (°C)											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Regiões quentes (ano todo > 19°C) Catalão (GO), Brasília (DF), Barreiras (BA)												
Regiões médias (jun. e jul. < 19°) Patrocínio (MG), Araguari (MG), Bonfinópolis (MG), Paracatu (MG), Marília (SP)												
Regiões frias (mai. a ago. < 19° C) Londrina (PR), Franca (SP), Varginha (MG), Carmo do Paranaíba (MG)												

 Temperaturas abaixo de 19°C
 Temperaturas acima de 19°C

Existem diferentes sistemas de irrigação que podem ser utilizados, sendo que a escolha do mais adequado depende de uma série de fatores, destacando-se o tipo de solo, a topografia, o tamanho da área, os fatores climáticos, os fatores relacionados ao manejo da cultura, o *deficit* hídrico, a capacidade de investimento do produtor e o custo do sistema de irrigação.

Além disso, deve-se ter em mente também que é grande o volume de água exigido na irrigação e, por isso, a necessidade de otimizar a utilização deste recurso é um dos aspectos mais importantes que deverá, também, ser considerado no momento de decidir pelo método e pelo sistema de irrigação a ser utilizado.

Em geral, a irrigação do cafeeiro é feita por dois métodos: aspersão e irrigação localizada, conforme será visto no item 4. Os sistemas de aspersão utilizados na irrigação desta cultura são os seguintes: aspersão convencional móvel (com aspersores pequenos, médios e canhões) ou fixa (que inclui o sistema de aspersão em malha), autopropelido e pivô central. Para a irrigação localizada, o sistema mais utilizado é o gotejamento, havendo, porém, regiões que utilizam a microaspersão, na forma de emissores chamados *microjets*. Existem também os sistemas modificados, como os tubos perfurados a laser (popularmente conhecidos como tripas), ainda com grande utilização no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, em Minas Gerais.

Em função de aspectos relacionados ao consumo de energia, exigência de mão-de-obra e outros aspectos operacionais, os sistemas mais viáveis de irrigação por aspersão têm sido o convencional (principalmente do tipo malha) e o pivô central. Já com relação à irrigação localizada, os sistemas mais utilizados são o gotejamento, por suas características técnicas que permitem uma irrigação com grande precisão, economia de água e energia, e as fitas de polietileno (sistema também conhecido como "tripa"), principalmente pelo menor custo de implantação.

Na Figura 2 estão dispostos custos de implantação atualizados dos principais sistemas de irrigação para o cafeeiro. Pode-se observar que, para irrigar a lavoura, o produtor tem opções que variam de U\$ 566,00 a 1.800,00/ha.

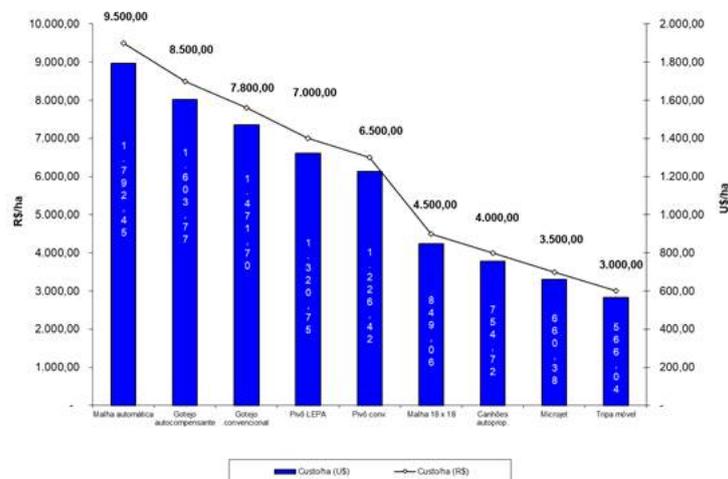


Figura 2. Custos de instalação dos principais sistemas de irrigação do cafeeiro (Conversão fevereiro de 2021 - U\$ 1,00 = R\$ 5,30).

Na Tabela 3, consta uma comparação dos custos de produção e lucratividade em lavouras em produção de café, por ano, irrigadas e sem irrigação, média de 4 safras, na região do cerrado mineiro. O resultado econômico da lavoura irrigada é de quase R\$ 20.000,00 ha⁻¹, comparado com cerca de R\$ 11.000,00 na área de sequeiro. Estes resultados são mais expressivos em regiões médias e quentes, comparando-se com as regiões frias. Mas nas regiões frias, conforme já dito, a irrigação é uma excelente garantia de produtividade em anos com deficits hídricos em fases fenológicas cruciais ao cafeeiro.

Tabela 3. Comparação de custos de produção e lucratividade na cultura do café cultivado no cerrado mineiro, média de 4 safras.

Componentes de custos	Irrigado (R\$)	Sequeiro (R\$)
Administração	1.500,00	1.100,00
Gestão técnica	65,00	40,00
Adubação via Solo	2.800,00	2.800,00
Adubação via Folha	325,00	365,00
Controle Pragas e Doenças	1.400,00	1.350,00
Controle Plantas Daninhas	600,00	508,46
Tratos Culturais	510,00	92,54
Irrigação	750,00	-
Colheita	1.650,00	1.750,00
Pós-Colheita	870,00	670,00
Comercialização	270,00	340,00
Depreciação	2.150,00	1.750,00
Remuneração	900,00	700,00
C.T.	13.790,00	11.466,00
Produtividade (média de 4 biênios)	55	38
Lucratividade (1 saca de 60 kg = R\$ 600,00)	33.000,00	22.800,00
Resultado (R\$/ha)	19.210,00	11.334,00

A composição dos custos nas lavouras irrigadas e de sequeiro é similar, com pequenas diferenças. Na Figura 3 constam as percentagens dos custos em lavouras irrigadas.

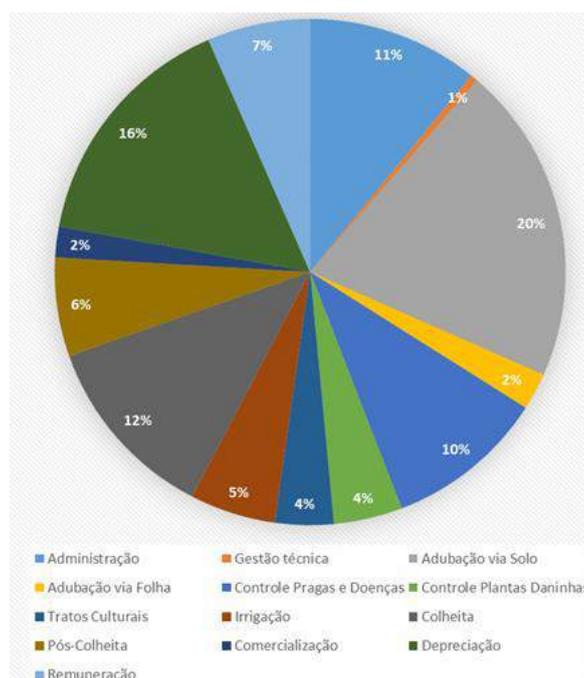


Figura 3. Composição dos custos de produção de lavouras irrigadas (A) e de sequeiro (B).

Até mesmo pelos resultados obtidos, há regiões onde a irrigação ocupa toda a área de café plantada, como Araguari (MG), no Triângulo Mineiro, como Barreiras, São Desidério e Cocos, na Bahia. Em outras regiões, as áreas irrigadas são menores, como Monte Carmelo (cerca de 70%) e Sul de Minas (menos de 10%). Porém, pelos resultados excepcionais obtidos nas últimas safras, o aumento da procura por sistemas de irrigação tem sido expressivo em todas as regiões cafeeiras do Brasil.

20.4 Sistemas de irrigação para o cafeeiro

Basicamente, os sistemas de irrigação para o cafeeiro podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas de irrigação com aplicação da água em área total e sistemas de irrigação com aplicação localizada da água (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2008), que molham apenas parte da área onde a cultura está implantada, conforme as Figuras 4 a 10.

20.4.1 Pivô central

Os primeiros pivôs centrais utilizados para café foram adaptados de outras lavouras, com irrigação em área total, ou seja, tanto nas linhas de café quanto nas entrelinhas. Apesar de viabilizar a cafeicultura empresarial nas regiões de cerrado, o sistema pivô central "convencional" ainda apresentava o inconveniente da aplicação de grandes volumes de água e com irrigação das entrelinhas do café, exigindo controle mais intensivo do mato.

A partir dessas dificuldades, surgiu uma inovação, adaptada da irrigação de pomares de citros nos Estados Unidos, com emissores capazes de irrigar somente a faixa de absorção radicular das plantas de citros. A partir desta tecnologia, pesquisadores e consultores brasileiros desenvolveram uma técnica extremamente interessante para a irrigação do cafeeiro com o pivô central, com plantio realizado em círculo, com emissores localizados sobre as linhas de café, denominados LEPA (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2002), sigla que representa, em inglês, *Low*

Energy Precision Application, ou seja: aplicação precisa de água com baixo consumo de energia, já que a pressão requerida é menor.

20.4.2 Aspersão convencional e em malha

Existem diferentes tipos de sistema de aspersão quanto à manipulação de seus componentes (tubos, conexões e aspersores), sendo eles: portátil, semifixo e fixo. Uma inovação que tem apresentado bons resultados na irrigação do cafeeiro é uma adaptação no sistema convencional de aspersão, o sistema de aspersão em malha (os ramais são conectados em sua extremidade para aumentar a uniformidade da pressão na rede hidráulica).

20.4.3 Autopropelido convencional

Consiste num aspersor tipo canhão montado em um veículo equipado com mecanismo autopropulsor que por meio da movimentação hidráulica de um carretel, enrola um cabo de aço capaz de deslocar o sistema ao longo da faixa de solo a ser irrigada.

20.4.4 Carretel enrolador

Mais moderno que o anterior, irriga uma faixa de terra continuamente, pelo deslocamento de um canhão hidráulico montado sobre rodas, conectado na extremidade de uma mangueira. Neste equipamento, apenas a mangueira é movimentada.

20.4.5 Tubos perfurados a laser ou "tripa"

Trata-se de uma combinação de aspersão convencional com irrigação localizada, onde jatos de água oriundos de pequenos orifícios (menores que 1 mm e perfurados a LASER na mangueira), irrigam as faixas de solo. As "tripas" são colocadas próximas às saias dos cafeeiros (com apenas um orifício de saída) ou no meio da entrelinha (dois orifícios de saída).

Devido ao seu baixo custo de implantação, esse sistema tem sido largamente utilizado em algumas regiões do Brasil, como Araguari, no Triângulo Mineiro. O maior inconveniente desse sistema, apesar do baixo custo de implantação, é a manutenção, pois a grande maioria dos projetos é feita com "tripas móveis", que requerem uma reposição anual da ordem de 30%. Alguns cafeicultores, para reduzirem esses custos, optaram por sistemas fixos (mangueiras disponíveis em toda área irrigada), mesmo com o maior custo de implantação.

20.4.6 Gotejamento

Efetua a irrigação sobre o solo, na área de maior absorção das raízes do cafeeiro, com gotejadores de pequena vazão (1 a 10 litros/hora), porém, capazes de irrigar com alta frequência (até mesmo várias vezes ao dia), mantendo a umidade do solo na zona radicular próxima à capacidade de campo, condição que facilita a absorção de água pelo cafeeiro (SANTINATO; FERNANDES, 2012).

A água é pressurizada pelo sistema de bombeamento, e, antes que chegue aos gotejadores, passa por um sistema de filtragem, prática essencial para o bom funcionamento desse sistema.



Figura 4. Pivô central convencional para café.



Figura 5. Pivô central em plantio circular do cafeeiro.



Figura 6. Irrigação de café com carretel enrolador.



Figura 7. Irrigação de café com tubos perfurados a laser (tripa).



Figura 8. Irrigação de café com aspersão em malha.



Figura 9. Irrigação por gotejamento em café.



Figura 10. Irrigação por *microjets* em café.

Para evitar problemas de vandalismo, alguns produtores têm adotado a técnica de enterrar os emissores, ação que deve ser cuidadosamente planejada, pois a colocação de gotejadores muito distantes da maior concentração de raízes do cafeeiro pode provocar reduções expressivas de desenvolvimento vegetativo e da produtividade do cafeeiro. Também requer a aplicação periódica de produtos capazes de evitar a intrusão de raízes nos gotejadores.

Como a qualidade da água pode afetar o funcionamento de gotejadores, alguns produtores em regiões de água com alto teor de ferro, tem optado por instalar na mangueira, sob a copa do cafeeiro, pequenos *sprays*, denominados *microjets*.

20.5 Gerenciamento e manejo da irrigação

Em um programa de manejo de uma lavoura de café, deve-se procurar maximizar a produtividade, com eficiência do uso da água e da energia, mantendo-se as condições físicas, químicas e biológicas do solo e de fitossanidade favoráveis ao bom desenvolvimento do cafeeiro.

O manejo correto da irrigação envolve três etapas distintas e complementares: (i) definição correta das datas e das lâminas de água a serem aplicadas (parte básica); (ii) definição das metas de eficiência de aplicação da água para o sistema, e ajuste do funcionamento do mesmo para atingir esses limites; e manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos e sistemas, para que tenham condições adequadas de funcionamento.

As características, funcionamento e potencialidades de um sistema de irrigação são aspectos que não podem ser negligenciados, pois eles influenciam no manejo. Tradicionalmente dividem-se os métodos de manejo da irrigação em três grupos: (i) os que se baseiam unicamente no conhecimento do estado hídrico do solo, ou seja, no manejo da água útil do solo, (ii) os que se baseiam no conhecimento do estado hídrico da planta, e (iii) os que se baseia na variação do clima.

20.5.1 Aspectos básicos do manejo da irrigação

O solo funciona como um reservatório de água para as plantas, retendo água que precipita durante as chuvas ou irrigações para que seja absorvida pelas plantas posteriormente. Na Figura 11 é representada, esquematicamente, a capacidade de armazenamento de água nos poros do solo, usando como símbolo, um reservatório com saídas.

Pode-se afirmar que água disponível para as plantas é a retida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Antes de qualquer programa de manejo da irrigação, é altamente recomendável que se retirem amostras de solo, para que em laboratório se elabore a curva de retenção da água no solo, em camadas de 20 em 20 cm, até a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura do café (60 cm). Para a cultura do café, recomenda-se a retirada de amostras em três profundidades para que seja feita a curva de retenção, 20, 40 e 60 cm.

O sistema radicular do cafeeiro é bastante plástico e varia em função da interação de carga genética da planta com várias condições do ambiente, tais como textura, estrutura, arejamento, fertilidade e reação do solo, temperatura, umidade, idade da planta, produção de frutos, sistemas de cultivo, pragas e doenças (RENA; MAESTRI, 1987). Estes autores, observaram que uma planta de cafeeiro arábica com 3 anos de idade pode apresentar, em média, 23 km de raízes absorventes, sendo a maior

concentração destas raízes obtida na camada superficial, variando de 30 a 60 cm de profundidade e de 50 a 80 cm de distância do tronco.

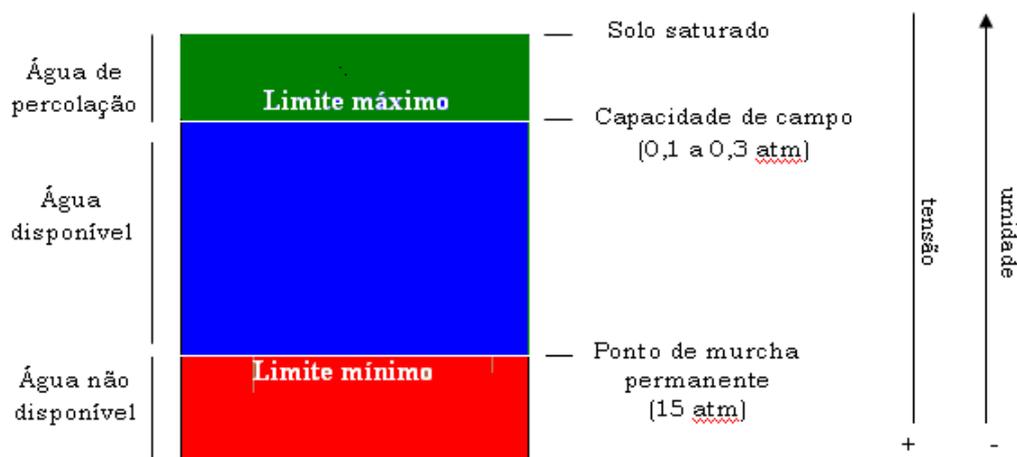


Figura 11. Esquema representativo da capacidade de armazenamento de água nos poros do solo.

O padrão de crescimento das raízes do cafeeiro pode ser afetado pela irrigação e aplicação de cobertura morta sobre a superfície do solo. A irrigação pode reduzir a profundidade de penetração da raiz axial e o desenvolvimento de raízes primárias e secundárias nas camadas mais profundas do solo. A aplicação de cobertura morta pode aumentar o tamanho do sistema radicular como um todo e a profundidade da raiz axial.

Na Figura 12 apresenta-se a distribuição vertical do sistema radicular do cafeeiro adulto irrigado por gotejamento, em camadas de 20 cm até 120 cm de profundidade. Em termos gerais, nas áreas estudadas, existe maior concentração de raízes nas camadas superficiais até a profundidade de 60 cm. Observa-se que a profundidade efetiva variou entre 86 a 94 cm para as lavouras cafeeiras de idade entre 6 a 8 anos.

A partir da determinação da profundidade efetiva do sistema radicular podemos obter informações necessárias para o manejo da fertirrigação, correlacionando a capacidade da planta de resistir a períodos sem irrigações e a capacidade da planta em absorver água e nutrientes em camadas mais distintas.

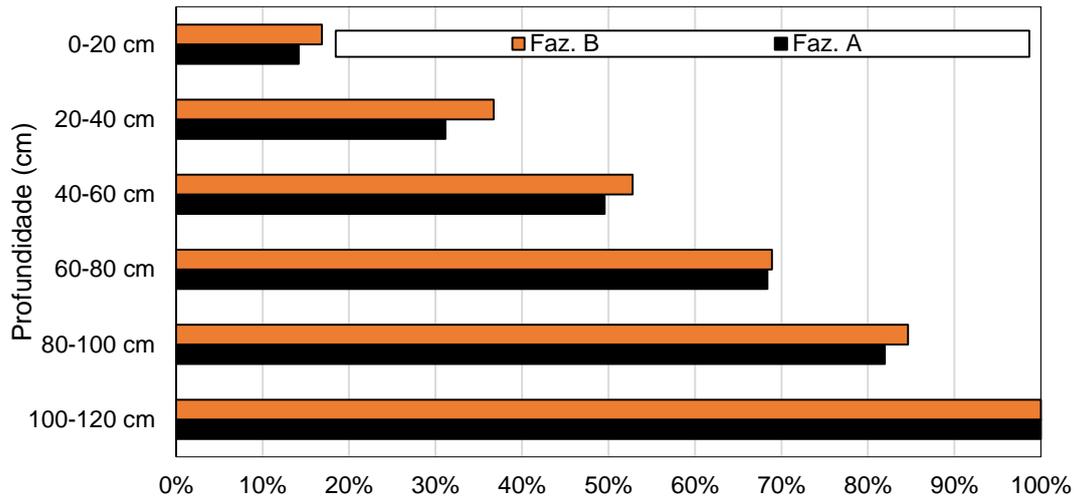


Figura 12. Distribuição vertical acumulada do sistema radicular do cafeeiro irrigado nas áreas estudadas.

Na Figura 13 apresenta-se a distribuição horizontal do sistema radicular do cafeeiro, isto é, ao longo da projeção da copa das plantas. Observa-se que não existe um padrão de distribuição do sistema radicular, existindo grande variabilidade entre as áreas estudadas.

Por se tratar de uma região com período de seco bem definido e a utilização da técnica de irrigação espera-se que a maior concentração de raízes fosse próxima ao tronco das plantas (sob a rua) e a 30 cm de distância, condição observa-se somente em 50% das áreas amostradas. Nas demais áreas, a maior concentração de raízes foi na posição a 60 cm do tronco das plantas, à margem da zona úmida criada pela aplicação do sistema de irrigação.

Destacam-se os resultados da Fazenda B, com expressou elevada concentração de raízes em posição fora da zona de atuação da faixa de umedecimento e nutrição, quando realiza-se fertirrigações.

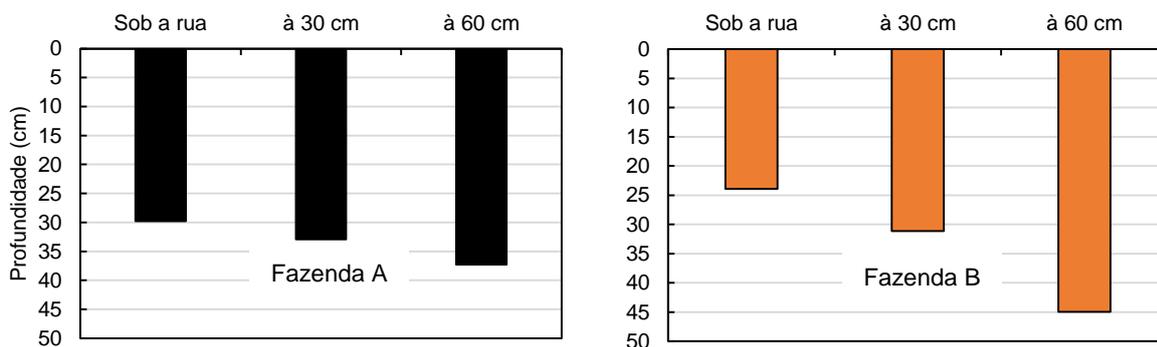


Figura 13. Distribuição horizontal do sistema radicular do cafeeiro irrigado nas áreas estudadas.

20.5.2 Métodos de manejo da irrigação

A determinação da época da irrigação e da quantidade de água a ser aplicada pode ser feita com o monitoramento da planta, do solo ou do clima.

20.5.2.1 Monitoramento do solo

O monitoramento do solo constitui uma metodologia usual para o manejo da irrigação, de modo independente ou associado a outros métodos de controle. Uma vez definidos os limites da CC e do PMP e a estratégia de uso da água disponível, o momento de se irrigar e a quantidade de água a ser aplicada são determinados mediante avaliação do teor de água no solo. Esta determinação pode ser realizada de forma direta, com a retirada de amostras de solo em várias profundidades e locais, definindo, posteriormente, a umidade existente pelo método padrão de estufa. Por questões operacionais, a determinação do teor de água no solo, para efeitos de manejo da irrigação, pode ser de forma indireta, existindo diversos equipamentos disponíveis no mercado. Os mais utilizados são o tensiômetros, os métodos eletrométricos, a sonda de nêutrons, o TDR (sigla do nome em inglês Reflectometria de domínio do tempo), métodos amplamente utilizados na pesquisa e divulgados na literatura sobre irrigação.

No campo, para a cultura do café, têm sido utilizados com mais frequência os tensiômetros (Figuras 14 e 15), que consistem de uma cápsula de cerâmica em contato com o solo, ligada a um vacuômetro, por meio de um tubo de PVC completamente cheio de água. Quando instalado no solo, a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo através dos poros da cápsula porosa e o equilíbrio se estabelece. Na prática, o intervalo de medida do tensiômetro é de $\psi_m=0$ (saturação) e $\psi_m=0,8$ atm, aproximadamente. Recomenda-se, por tipo de solo, a instalação de pelo menos 5 baterias com três tensiômetros cada, em três profundidades (20, 40 e 60 cm), com leituras diárias, interpretadas conforme a curva de retenção de água do solo.



Figura 14. Tensiômetro.



Figura 15. Bateria de tensiômetros para manejo da irrigação de café, em três profundidades.

20.5.2.2 Monitoramento do clima

A metodologia de monitoramento do clima uma das maneiras mais simples e operacionais de manejar a irrigação do cafeeiro. As variáveis meteorológicas são utilizadas para determinar indiretamente as necessidades de água da cultura. Trata-se de um balanço hídrico, onde se avalia a entrada de água (irrigação e chuva) e a saída (evapotranspiração, percolação e escoamento superficial).

A precipitação deve ser medida em pluviômetros instalados em vários pontos da fazenda (Figura 16). Deve-se evitar a utilização dos chamados "pluviômetros agrônômicos", pois tem reduzida área de captação da água da chuva, levando a erros de medida (Figura 17).



Figura 16. Pluviômetro para medição da precipitação.



Figura 17. Pluviômetro "agronômico".

A evapotranspiração pode ser obtida por meio de medições diretas no campo (lisímetros) ou por estimativas baseada em dados climáticos ou da cultura. As medições diretas no campo são muito caras e são utilizadas principalmente para calibrar os métodos de estimativa de evapotranspiração baseados em dados climáticos.

Tabela 4. Coeficiente de cultura (K_c) do café (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 2008).

Idade da planta (anos)	Espaçamento entre ruas (m) x Espaçamento entre plantas (m)	K_c
Lavoura adulta (mais de 3 anos)	> 3,0 x > 1,0 – 2.500 plantas ha ⁻¹	1,0
	> 3,0 x 0,5 a 1,0 – 3.333 plantas ha ⁻¹	1,1
	2 a < 3 x 0,5 a 1,0 – 6.666 plantas ha ⁻¹	1,2
	1 a < 2 x 0,5 a 1,0 – 13.333 plantas ha ⁻¹	1,3
Lavoura nova (de 1 a 3 anos)	> 3,0 x > 1,0 – 2.500 plantas ha ⁻¹	0,8
	> 3,0 x 0,5 a 1,0 – 3.333 plantas ha ⁻¹	0,9
	2 a < 3 x 0,5 a 1,0 – 6.666 plantas ha ⁻¹	1,0
	1 a < 2 x 0,5 a 1,0 – 13.333 plantas ha ⁻¹	1,1
Lavoura nova (até 1 ano)	> 3,0 x > 1,0 – 2.500 plantas ha ⁻¹	0,6
	> 3,0 x 0,5 a 1,0 – 3.333 plantas ha ⁻¹	0,7
	2 a < 3 x 0,5 a 1,0 – 6.666 plantas ha ⁻¹	0,8
	1 a < 2 x 0,5 a 1,0 – 13.333 plantas ha ⁻¹	0,9

Calcula-se a evapotranspiração da cultura do café multiplicando-se a evapotranspiração potencial de referência (ET_o) por três coeficientes: 1) coeficiente de cultura (K_c , Tabela 4), que incorpora os efeitos do tipo de cultura e sua fase de desenvolvimento, frequência e forma de aplicação da água; b) coeficiente de localização da irrigação (K_L) e c) coeficiente de umidade do solo (K_s). Existem vários métodos que podem ser utilizados para a estimativa da evapotranspiração, como os de Camargo, Penman, Penman-Monteith, Radiação Solar, Hargreaves, Linacre, Blaney Criddle, dentre outros.

Apesar da necessidade das informações meteorológicas completas para se obter um nível de precisão aceitável, ainda existem dificuldades operacionais e financeiras para a implantação de uma estação meteorológica automática em muitas fazendas

cafeiras (Figura 18). Assim, de forma provisória, podem-se utilizar metodologias simplificadas, destacando-se aquelas que utilizam a temperatura do ar e a evaporação de tanques, como o tanque classe A (Figura 19).



Figura 18. Estação automática instalada próxima à lavoura de café.



Figura 19. Tanque de evaporação tipo classe A.

20.5.2.3 Monitoramento da planta

Apesar da maior ênfase no monitoramento meteorológico e baseado em medidas do solo, o monitoramento da planta começa a ter destaque para algumas culturas e alguns métodos de medição, a exemplo da temperatura do dossel obtido por termômetros de infravermelho.

Esses métodos por indicarem a condição hídrica da planta são particularmente interessantes no caso da irrigação com *deficit* e para estresse hídrico controlado, na indução de florescimento em fruteiras e maturação da cana, por exemplo.

Medidas de resistência estomática, potencial de água na folha, temperatura do dossel e turgidez do caule (dendômetros), entre outros, há relatos de sucesso, na literatura científica, para definir índices de estresse hídrico em diversas culturas. Entretanto, cada uma dessas técnicas apresenta limitações de uso em campo, sendo a principal limitação a pequena disponibilidade de informações quanto aos limites e índices recomendados para as culturas de interesse econômico.

Cada uma dessas técnicas apresenta limitações de aplicabilidade em campo, em razão da pequena disponibilidade de informações dos limites e dos índices recomendáveis para a maioria das culturas e dos problemas operacionais. Hoje já existem empresas que disponibilizam sensores que fazem medidas em tempo real das medidas nas plantas, porém, ainda estão sendo conduzidos os estudos para aferições no campo.

20.5.2.4 Métodos combinados

Já estão disponíveis métodos de manejo da irrigação que utilizam de medições na planta, no clima e no solo, com excelentes perspectivas para o manejo mais racional da irrigação do cafeeiro. Porém, ainda é necessário que sejam feitos testes no campo para a adoção por parte dos cafeicultores irrigantes.

20.6 Fertirrigação do cafeeiro

A tecnologia da irrigação passou muito rapidamente de uma técnica experimental para uma tecnologia comercialmente significativa. A intensificação da agricultura irrigada abriu as portas para aplicação de fertilizantes via água, sendo nos países onde a agricultura irrigada é mais desenvolvida, a aplicação de fertilizantes, inseticidas e herbicidas, via água de irrigação é uma prática rotineira. O uso da tecnologia da fertirrigação está diretamente associado às culturas de alto valor comercial e às regiões com bom nível de desenvolvimento da agricultura irrigada.

Porém, muitos produtores de café irrigantes ainda consideram a cafeicultura irrigada como a cafeicultura de sequeiro acrescida de água. Muitos fatores devem ser analisados quando se adota a tecnologia da irrigação e da fertirrigação. Como a planta irrigada apresenta maior desenvolvimento vegetativo-produtivo, desenvolvimento esse maior ou menor dependendo da região, as recomendações de adubação devem ser diferentes das adotadas em áreas de sequeiro.

Para que se possam alcançar elevadas produções no cafezal, capazes de suportar todos os encargos com seu esmerado cultivo e proteção fitossanitária, torna-se imprescindível um bom plano de adubação com macro e micronutrientes, para garantir a manutenção dos cafeeiros em bons estados. O nitrogênio é um dos principais macronutrientes para o cafeeiro, só sendo armazenado em forma orgânica, da qual é lentamente liberado pela decomposição (mineralização). Ele é absorvido do solo principalmente em forma nítrica. Como os teores de matéria orgânica são geralmente baixos (à exceção dos ácidos húmicos) e tendo em vista que as perdas de N ocorrem rapidamente, é preciso repor o nutriente através de adubações parceladas, efetuadas nas épocas de maior necessidade para a vegetação e a produção do ano.

Por exemplo, na avaliação do aproveitamento do nitrogênio do fertilizante, na maioria das pesquisas, o aproveitamento é de 50% ou menos, permanecendo no solo, para efeito residual, 30% ou menos do N-fertilizante. Este baixo aproveitamento causa uma perda de 19,5 bilhões de dólares por ano e essa quantidade perdida não pode ser utilizada pela planta, além de causar a redução da fixação biológica pelos microrganismos e também causar o transporte do elemento pela chuva e água de irrigação, gerando eutrofização de fontes hídricas e acumulando nitrato na água potável, que é potencialmente maléfico para a saúde humana (BRENTROP; PALLIERE, 2011; DI TIAN *et al.*, 2017).

Várias possibilidades têm sido levantadas para justificar as perdas de nitrogênio, como: (i) volatilização de NH_3 , especialmente de fontes amídicas-amoniacais; (ii) lixiviação de NO_3 para fora da zona de exploração das raízes do solo e (iii) desnitrificação, que pode ocorrer em solos com drenagem deficiente ou em sistemas em que há elevada disponibilidade de carbono e anaerobiose, gerando condições favoráveis à redução do nitrato.

Segundo a FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2016), no ano de 2016 foram consumidos 194 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo 60% deste total de fontes nitrogenadas. O mau uso dos adubos nitrogenados pode causar danos ambientais. Segundo a Fapesp (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2008), grande parte do nitrogênio antropogênico se perde no ar, na água e no solo, causando problemas ambientais e de saúde humana em cascata. Ao mesmo tempo, a produção de alimentos em algumas partes do mundo é deficiente em nitrogênio, ressaltando as disparidades na produção de fertilizantes que contêm o elemento químico.

Martinelli (2007) observa que o maior problema relacionado à utilização do nitrogênio na agricultura e pecuária é a ineficiência no seu uso. Como raramente todas as partes das plantas são consumidas, ocorre uma perda de 16 unidades de N advinda da transformação da cultura em produto agrícola. Na transformação do produto em alimento, há uma perda adicional, e do alimento ao consumo, há outra perda devido ao armazenamento, transporte e manipulação do alimento. Assim, de 100 unidades produzidas, somente 14 unidades são consumidas, ou seja, 76 unidades são perdidas para o meio ambiente (Figura 20).

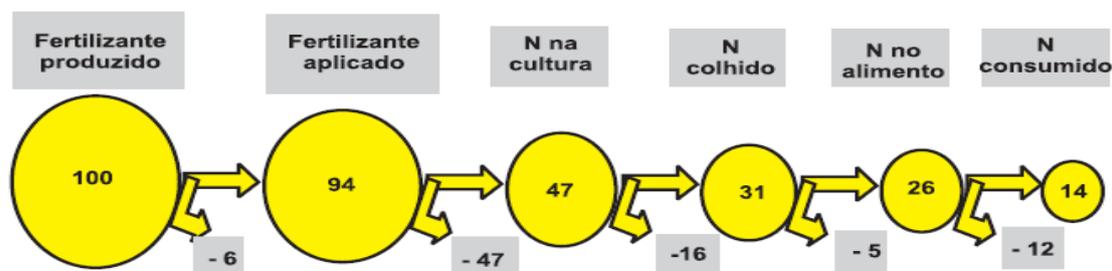


Figura 20. Perdas de nitrogênio ao longo de uma cadeia destinada à produção vegetal (MARTINELLI, 2007).

Ainda segundo os mesmos autores, numa cadeia mais complexa, como a produção de proteína animal a partir de grãos, não de pastagens, as perdas aumentam, pois a cultura é transformada primeiro em ração, que por sua vez é estocada no animal, o qual é transformado em alimento e, finalmente, consumido. Nesse caso mais complexo, das 100 unidades de fertilizantes produzidas, somente 4 unidades são consumidas. Portanto, ocorre uma perda de 96 unidades (Figura 21). E, quanto mais complexo é o sistema de produção, maior é o vazamento. Por exemplo, de 100 unidades de fertilizante produzidas, 6 unidades são perdidas no transporte e na aplicação. Portanto, somente 94 unidades serão utilizadas. Dessas unidades aplicadas no campo, a cultura utiliza, no máximo, a metade, sendo a maior parte perdida para o meio através dos processos de denitrificação, volatilização e lixiviação.

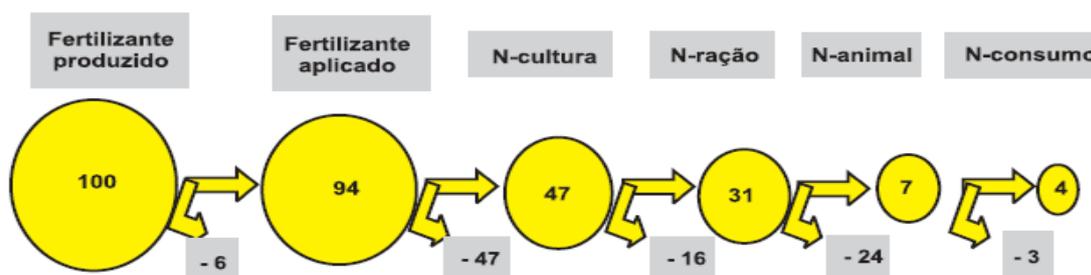


Figura 21. Perdas de nitrogênio ao longo da cadeia pecuária (MARTINELLI, 2007).

20.7 Considerações finais

A cafeicultura brasileira, além de ser a maior do mundo, é uma das mais tecnológicas, pois alia altas produtividades à excelente qualidade do café produzido. Esta superioridade é alcançada devido a vários fatores, dentre os quais se destacam o clima favorável, a mecanização em praticamente todas as etapas de produção, as modernas práticas fitossanitárias, culturais e nutricionais e, também, à irrigação. Este capítulo abordou a irrigação do cafeeiro, que teve grande aumento nos últimos 20 anos, atingindo a expressiva marca de 450 mil hectares irrigados.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas da irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília: ANA, 2021.
- AGRIANUAL 2010. FNP Consultoria e Comércio, São Paulo, 662p., 2009.
- AMARASINGHE, U.A.; HOANH, C.T.; D´HAEZE, D.; HUNG, T.Q. Toward sustainable coffee production in Vietnam: more coffee with less water. **Agricultural Systems**, v.136, p.96-105, 2015.
- ANDRADE, C.L.T.; COELHO, E.F.; COUTO, L.; SILVA, E.L. Parâmetros de solo-água para engenharia de irrigação e ambiental, Poços de Caldas-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas. **Resumos**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, p.1-39, 1998.
- ANEJA, V.P.; SCHLESINGER, W.H.; ERISMAN, J.W. Farming pollution. **National Geographic**, v.1, p.409-411, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo236>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- ANTUNES, R.C.B.; MANTOVANI, E.C.; COSTA, L.C.; RENA, A.B.; ALVARENGA, A.P. Determinação da evapotranspiração da cultura do cafeeiro em formação, Brasília-DF. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos**. Brasília: Embrapa Café, v.2, p.810, 2000.
- ANTUNES, R.C.B.; RENA, A.B.; MANTOVANI, E.C.; ALVARENGA, A.P.; COSTA, L. C.; DIAS, A.S.C. Influência da fertirrigação no desenvolvimento do café arábica em formação. In: MANTOVANI, E.C.; SOUZA, L.O.C.; SOARES, A.R. (Ed.). **Energia na agricultura, boletim técnico n.4**, 118 p., p.64-67, 2001b.
- ANTUNES, R.C.B.; RENA, A.B.; MANTOVANI, E.C.; ALVARENGA, A.P.; COSTA, L.C.; DIAS, A.S.C. Influência da fertirrigação em nitrogênio e potássio nos componentes vegetativos do cafeeiro arábica em formação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, 2000, Poços de Caldas. **Anais**. Poços de Caldas: Embrapa-Café, 2000.
- ARAÚJO, J.C.A. **Análise do comportamento de uma população de café Icatu (H-4782-7) sob condições de irrigação por gotejamento e quebra-vento artificial**. 87 p., 1982. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.
- ASSIS, G.A. **Irrigação para cafeeiros em diferentes densidades de plantio**. 97p., 2010. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.
- BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação Agrícola**. 3. Ed. Jaboticabal: FUNEP, 247p., 1995.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 596p., 1996.
- BERTOL, I.; MELLO, E.L.; GUADAGNIN, J.C.; ZAPAROLLI, A.L.V.; CARRAFA, M.R. Nutrient losses by water erosion. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.60, n.3, p.581-586, 2003.
- BONOMO, R.; OLIVEIRA, L.F.C.; SILVEIRA NETO, A.N.; BONOMO, P. Produtividade de cafeeiros arábica irrigados no cerrado goiano. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia: UFG. v.38, n.4, p.233-240, 2008.
- BORTOLOTTI, R.P.; BRUNO, I.P.; DOURADO NETO, D.; TIMM, L.C.; NUNES DA SILVA, A.; REICHARDT, K. Nitrate leaching through climatologic water balance in a fertigate coffee plantation. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 6, p. 785-792, 2013.
- BORTOLOTTI, R.P.; BRUNO, I.P.; REICHARDT, K.; TIMM, L.C.; TELMO JORGE CARNEIRO AMADO, T.J.C.; FERREIRA, A.O. Nitrogen fertilizer (¹⁵N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. **Revista Ceres**, Viçosa, v.59, n.4, 2012.
- BOTELHO, C.E.; SOARES, T.L.; OLIVEIRA, A.C.B.; PEREIRA, A.A. Cultivares de café e suas principais características agrônômicas e tecnológicas. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte: Epamig, v.29, n.247, p.31-41, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normas Climatológicas 1961-1990**. Brasília, 84p., 1992.

BRENTROP, F.; PALLIERE, C. Nitrogen Use Efficiency as an Agro-Environmental Indicator. In: OECD WORKSHOP: AGRI-ENVIRONMENTAL INDICATORS: LESSONS LEARNT AND FUTURE DIRECTIONS. 2010. Leysin, Suíça, p. 1-9, 23-26 Março de 2010.

BRUNO, I.P.; UNKOVICH, M.J.; BORTOLOTTI, R.P.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K. Fertilizer nitrogen in fertigated coffee crop: absorption chances in plant compartments over time. **Field Crops Research**, v.124, n.3, p.369-377, 2011.

BURT, C.M. **Fertigation**: the next frontier. *Irrigation Business and Technology*, San Luis Obispo, CA, v.3, n.4, p.16-19, 1995. Disponível em: http://www.itrc.org/papers/fertigation_nextfrontier.pdf. Acesso em: 15 nov. 2003.

CADAHÍA, C. **Fertirrigación**: cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 475p., 1998.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v.60, n.1, p.65-68, 2001.

CARRIJO, O.A.; SILVA, W.L.C.; MAROUELLI, W.A.; SILVA, H.R. Tendências e desafios da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). *Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças*. Ed. Guaíba: **Agropecuária**, 460 p., p.155-169, 1999.

CARVALHO, G.R.; BARTHOLO, G.F.; MENDES, A.N.G.; NOGUEIRA, A.M.; MAGALHÃES, M.M. Seleção de progênies oriundas do cruzamento entre Catuaí e Mundo Novo em diferentes regiões do Estado de Minas Gerais. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.4, p.583-590, 2006.

CARVALHO, H.P.; MELO, B.; MARCUZZO, K.V.; TEODORO, R.E.F.; SEVERINO, G.M. Avaliação de cultivares e linhagens de café (*Coffea arabica* L.) nas condições de cerrado em Uberlândia-MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.19, n.3, p.59-68, 2003.

CASTELLANOS, M.T.; TARQUIS, A.M.; RIBASA, F.; CABELLOA, M.J.; ARCED, A.; CARTAGENA, M.C. Nitrogen fertigation: an integrated agronomic and environmental study. **Agricultural Water Management**, v.120, n.31, p.46-55, 2013.

CLEMENTE, F.M.V.T. **Faixas críticas de teores foliares de macro e micronutrientes em no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no primeiro ano de formação da lavoura**. 63p., 2005. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

CLEMENTE, F.M.V.T.; CARVALHO, J.G.D.; GUIMARÃES, R.J.; MENDES, A.N.G. Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes no cafeeiro em pós-plantio - primeiro ano. **Coffee Science**. v.3, n.1, p.47-57, 2008.

COELHO, A.M. Fertigação. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIANA, P.A. (Ed.). **Quimigação**: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação. Embrapa-SPI, Brasília, DF, 315p., p.201-227, 1994.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, 359p., p.289-302, 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café safra 2019**. Brasília: CONAB. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 21 jul. 2019.

CORRÊA, J.B.; GARCIA, A.W.R.; COSTA, P.C. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, **Anais**, v.13, 1986.

COSTA, E.F.; FRANÇA, G.E.; ALVES, V.M.C. Aplicação de fertilizante via água de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.129, p.63-68, 1986.

COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; BARROS, T.H.S.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; FERNANDES, A.L.T. Leaf area index and radiation extinction coefficient of a coffee canopy under variable drip irrigation

levels. **Acta Scientiarum**, v.41, p.2-8, 2019. Disponível em: 10.4025/actasciagr. v41i1.42703. Acesso em: 21 jul. 2019.

COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; BARROS, T.H.S.; FERNANDES, A.L.T. Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. **Irrigation and Drainage**, v.1, p.1-11, 2020.

COTTA, J.A.O.; SALAMI, F.H.; MARQUES, A.R.; REZENDE, M.O.; LANDGRAF, M.D. Validação do método para determinação de Nitrogênio Kjeldahl Total. **Revista Analytica**, Rio de Janeiro, n.26, p.68-75, 2007.

DA SILVA, A.L.; FARIA, M.A.; REIS, R.P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.37-44, 2003.

DAMATTA, F. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v.16, n.1, p.1-6, 2004.

DAMATTA, F.M.; LOOS, R.A.; SILVA, E.A.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *Coffea canephora* Pierre. **Trees**, v.16, n.8, p.555-558, 2002.

TIAN, D.; ZHANG, Y.Y.; ZHOU, Y.Z.; MU, Y.J.; LIU, J.F.; ZHANG, C.L.; LIU, P.F. Effect of nitrification inhibitors on mitigating N₂O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain. **Science of the Total Environment**, v.598, p.87-96, 2017. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.03.220.

DONAGEMMA, K.G.; RUIZ, H.A.; ALVAREZ, V.H.; FERREIRA, P.A.; CANTARUTTI, R.B.; SILVA, A.T.; FIGUEIREDO, G.C. Distribuição do amônio, nitrato, potássio e fósforo em colunas de latossolos fertirrigadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, 2008.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Technical note, 33. Roma: FAO, 193p., 1979.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPANS, J.W.; PARLANGE, M.B. **Programa SWRC (Version 1.00)**: Soil-Water Retention Curve (Software). Piracicaba: Esalq; Davis: University of California, 1995.

DRUMMOND, L.C.D.; FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; MARTINS, C.A.; SOUSA, G.F.; OLIVEIRA, C.B.; TEIXEIRA, M.P. Avaliação da produtividade e qualidade do cafeeiro cultivado em condições de cerrado e irrigado por diferentes sistemas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 8. Araguari, MG. **Anais**. Araguari: Associação dos Cafeicultores de Araguari, p.30-34, 2006.

DZUNG, N.A.; KHANH, V.T.P. Research on impact of chitosan oligomers on biophysical characteristics, growth, development and drought resistance of coffee. **Carbohydrate Polymers**, v.84, p.751-755, 2010.

FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA, A.G.Y; VILLA NOVA, N.A.; FAVARIN, M.G.G.G. Equações para estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.769-773, 2002.

FEITOSA FILHO, J.C.; CAVALCANTE, L.F.; LOPES, W.F.; SANTOS, C.S.; LEITE JÚNIOR, G.P.; LOPES, W.F.; PINTO, J.M. Estudos de doses de nitrogênio e de potássio aplicadas em banana por fertirrigação em comparação à adubação convencional. In: WORKSHOP DE FERTIRRIGAÇÃO, 2, Piracicaba. **Artigos científicos**. Piracicaba: Esalq/USP, p.48-66, 2001.

FERNANDES, A.L.T.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.231-240, 2012.

FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; DRUMMOND, L.C.D.; OLIVEIRA, C.B.; SANTOS, W.O. Avaliação da fertirrigação com diferentes fontes de fertilizantes químicos e orgânicos na nutrição do cafeeiro cultivados em condições de cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 8, 2006, Araguari. **Anais**, ACA, p.12-15, 2006.

- FERNANDES, A.L.T.; SILVA, R.O.; SALDANHA, L.; BETINI, M.O.; BROETTO, F. Effect of seaweed extract formulation on coffee plants at different irrigation levels. **Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary**, v.6, p.60-74, 2019.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, São Carlos. **Anais**. São Carlos: UFSCar, n.45, p.255-258, 2000.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Current word fertilizer trends an outlook to 2018**. Rome, Italy, 66p., 2016.
- FOWLER, D.; COYLE, M.; SKIBA, U.; SUTTON, M.A.; CAPE, J.N.; REIS, S.; SHEPPARD, L.J.; JENKINS, A.; GRIZZETTI, B.; GALLOWAY, J.N.; VITOUSEK, P.; LEACH, A.; BOUWMAN, A.F.; BUTTERBACH-BAHL, K.; DENTENER, F.; STEVENSON, D.; AMANN, M.; VOSS, M. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, B 368, 2013. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- FRIZZONE, J.A.; ZANINI, J.R.; PAES, L.A.D.; NASCIMENTO, V.M. **Fertirrigação mineral**. Boletim Técnico 2. Ilha Solteira: Unesp, 31p., 1985.
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Nitrogênio demais**. Fapesp, 2008. Disponível em: <http://midiaemeioambiente.blogspot.com/2008>. Acesso em: 10 abr. 2010.
- GARCIA, F.H.S.; MATUTE, A.F.M.; SILVA, L.C.; SANTOS, H.R.B.; BOTELHO, D.S.; RODRIGUES, M.; JOÃO PAULO RODRIGUES ALVES DELFINO BARBOSA, J.P.R.A.D. Análise fisiológica em mudas de cafeeiro com cercosporiose submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Summa Phytopathology**, Botucatu, v.45, p.83-88, 2019.
- GARRIDO, M.A.T. **Respostas do feijoeiro às lâminas de água e adubação nitrogenada**. 205p., 1998. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.
- GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.4, p.892-898, 1980.
- GOMIDE, R.L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas, MG **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA/SBEA, p.133- 238, 1998.
- GROENVELD, T.; KONH, Y.Y.; GROSS, A.; LAZAROVITHC, N. Optimization of nitrogen use efficiency by means of fertigation management in an integrated aquacultura-agriculture system. **Journal of Cleaner Production**, v.212, p.401-408, 2019.
- GUANDIQUE, M.E.G. **Balanco hídrico no solo e consumo de água pela cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. 94p., 1993. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1993.
- GUIMARÃES, P.T.G.; GARCIA, A.W.R.; ALVAREZ, V.H.; PREZOTTI, L.C.; VIANA, A.S.; MIGUEL, A.E.; MALAVOLTA, E.; CORRÊA, J.B.; LOPES, A.S.; NOGUEIRA, F.D.; MONTEIRO, A.V.C.; OLIVEIRA, J.A. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVARES V.V.H. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa, p.289-302, 1999.
- GUO, J.H.; LIU, X.J.; ZHANG, Y.; SHEN, J.L.; HAN, W.X.; ZHANG, W.F.; CHRISTIE, P.; GOULDING, K.W.T.; VITOUSEK, P.M.; ZHANG, F.S. Significant acidification in major Chinese croplands. **Science**, v.80, p.1008-1010, 2011.
- HAGIN, J.; TICKER, B. **Fertilization of dryland and irrigated soils**. New York: Springer-Verlag, 188p., 1982.
- HERNANDEZ, F.B.T. Potencialidades da fertirrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLUIDOS. Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Esalq, p.199-210, 1993.

- HO, T.Q.; HOANG, V.N.; WILSON, C.; NGUYEN, T.T. Eco-efficiency analysis of sustainability-certified coffee production in Vietnam. **Journal of Cleaner Production**, v.183, p.251-2560, 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca/brasil>. Acesso em: 3 fev. 2021.
- KARASAHIN, M.; DUNDAR, O.; SAMANANCI, A. The way of yield increasing and cost reducing in agriculture: smart irrigation and fertigation. **Turkish Journal of Agriculture: Food Science and Technology**, v.6, p.1370-1380, 2018.
- KRAMER, P.J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 489 p., 1983.
- LAURINDO, V.T. **Interferência da fertirrigação, de lâminas e modos de aplicação localizada de água nos atributos químicos do solo e na produtividade da laranja Valência**. 100p., 2005. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2005.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, 497p., 1999.
- LIBARDI, V.C.M. **Efeitos de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro**. 49p., 1996. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1996.
- LIMA, J.V.O.; FERNANDES, A.L.T.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; CRUZ, P.O.H.; CRUZ, J.P.H.; SANTANA, M.J. Irrigation management with IoT sensor in three phenological phases of coffee crop. **Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary**, v.6, p.78-96, 2019.
- LIU, X.; FUSHENG, L.; ZHANG, Y.; YANG, Q. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, n.172, p.1-8, 2016.
- LIU, X.; QI, F.L.; YANG, Q.; YU, L. Impacts of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of Arabica coffee under different shading levels in dry and hot regions of southwest China. **Agricultural water management**, v.204, p.192-300, 2018.
- LOFTFIELD, E.; CORNELIS, M.C.; CAPORASO, N.; YOU, K.; SINHA, R.; FREEDMAN, N. Association of coffee drinking with mortality by genetic variation in caffeine metabolism. **JAMA International Medicine**, v.178, n.8, p.1086-1097, 2018.
- LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. **Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 520p., 1992.
- LUONG, Q.V.; TAUER, L.W. A real options of coffee planting in Vietnam. **Agricultural Economics**, v.35, p.49-57, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2006.00138x>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- MACHADO, P.B. **Efeito de diferentes lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 43p., 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 631p., 2006.
- MALAVOLTA, E. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, Piracicaba, 224p. 1981.
- MALAVOLTA, E.; YAMADA, T. **Nutrição e adubação do cafeeiro**. Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 224p., 1983.
- MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.R. **Irrigação do cafeeiro**: informações técnicas e coletânea de trabalhos. Boletim Técnico, 8. Viçosa. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. UFV, DEA, 260p., 2003.

- MARTINELLI, L.A. Os caminhos do nitrogênio: do fertilizante ao poluente. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, IPNI, n.118, p.6-10, 2007.
- MATIELLO, J.B.; DANTAS, S.F.A. Desenvolvimento do cafeeiro e do sistema radicular com e sem irrigação em Brejão, PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 14, Campinas. **Resumos**. Campinas, p.165, 1987.
- MATIELLO, J.B.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R. **Adubos, corretivos e defensivos para a lavoura cafeeira**. Varginha, Embrapa Café, 89p., 2006.
- MATIELLO, J.B.; GARCIA, A.W.R.; FIORAVANTE, N.E. Efeito da irrigação por aspersão em cafeeiros cultivados em Varginha, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 30, São Lourenço, **Anais**, p.54-55, 2004.
- MENDES, A.N.G.; GUIMARÃES, R.J. **Plantio e formação da lavoura cafeeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 42p., 1998.
- MIRANDA, F.R.; DRUMOND, L.C.D.; RONCHI, C.P. Synchronizing coffee blossoming and fruit ripening in irrigated crops of the Brazilian Cerrado Mineiro Region. **Australian Journal of Crop Science**, v.14, n.4, p.605-613, 2020.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- NETO, A.C.F.; MOURA, B.R.; MANTOVANI, E.C.; RENA, A.B.; PALARETTI, L.F. Influência da irrigação e da fertirrigação na produtividade da variedade acaia cerrado (dados de duas safras), em Viçosa - MG, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 6. Araguari, **Anais**. Araguari, p.141-144, 2002.
- NIKOLSKII, Y.N.; AIDAROV, I.P.; LANDEROS-SANCHEZ, C.; PCHYOLKIN, V.V. Impact of long-term freshwater irrigation on soil fertility. **Irrigation and Drainage**, p.1-9, 2019. DOI 10.1002/ird.2381 IMPACT.
- NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p., 2007.
- OLIVEIRA, P.M. **Estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**. 90p., 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: **Agropecuária**, p.11-154, 1999.
- PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). Workshop de Fertirrigação, 1. Piracicaba. Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Ed. **Agropecuária**, p.11-67, 1999.
- PARAMASIVAM, S.; ALVA, A.K.; FARES, A.; SAJWAN, K.S. Estimation leaching in an Entisol under optimum citrus production. **Soil Science Society American Journal**, v.65, p.914-921, 2001.
- PAVANI, L.C. **Evapotranspiração e produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) sob três níveis de potencial da água no solo**. 171p., 1985. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1985.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: Fealq, 183p., 1997.
- PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4. Londrina, PR. **Anais**. Londrina: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2005.
- PETEL, M.R.; SERA, T.; RIBEIRO FILHO, C.; SERA, G.H.; CID, C.G. Interação genótipo-ambiente na maturação dos frutos em variedades e cultivares de *Coffea arabica* no Paraná. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4. Londrina, PR. **Anais**. Londrina: Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, 2005.

- PIMENTA, C.J. **Qualidade de café**. Lavras: Editora UFLA, 304p., 2003.
- POWER, J.F. Role of moisture stress in plant nutritional functions. In: BALIGAR, V.C.; DUNCAN, R.R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, p.453-474, 1990.
- PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.; CORRÊA, L.A.; SILVA, A.G.; CANTARELLA, H. Lixiviação de nitrato em pastagem de coastcross adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.35, n.3, p.683-690, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982006000300008&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 12 fev. 2021.
- QUAGGIO, J.A.; SOUZA, T.R.; BACHIEGA ZAMBROSI, F.C.; MARCELLI, B.; MATTOS, D. Nitrogen-fertilizer forms affect the nitrogen-use efficiency in fertigated citrus groves. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.177, 2014.
- REICHARDT, K. **Processos de transferências no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 466p., 1985.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; URQUIAGA, S.C. Fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In: **International Atomic Energy Agency** (Ed.). **Agrochemicals: fate in food and the environment**. Viena, p.277-290, 1982.
- RENA, A.B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Eds.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, p.119-147, 1987.
- RODRIGUES, N.A.; REIS, E.A.; TAVARES, M. Influências dos fatores climáticos no custo de produção do café arábica. **Custos e @gronegocio on line**. v.10, n.3, p.216-255, 2014.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T. **Cultivo do cafeeiro irrigado por gotejamento**. 2. Ed. Uberaba: 388p., 2012.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. Cultivo do Cafeeiro Irrigado em plantio circular sob pivô central. Belo Horizonte: **O Lutador**, 1. Ed., 252p., 2002.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. Irrigação na Cultura do Café. O Belo Horizonte: **O Lutador**, 2. Ed. 483p., 2008.
- SCALCO, M.S.; RIBEIRO, A.A.S.; COLOMBO, A.; FARIA, M.A.; PAIVA, L.C.; CARVALHO, C.H.M. Diagnóstico da cafeicultura irrigada na região sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 6, Araguari, **Anais**. Araguari, p.20-24, 2003.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JR., A.A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.437-447, 2000.
- SEDIYAMA, C.G.; RIBEIRO, A.; LEAL, B.G. Relações clima-água-plantas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Poços de Caldas. **Resumos**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, p.46-85, 1998.
- SILVA, A.M.; COELHO, G.; SILVA P.A.M.; COELHO G.S.; FREITAS R.A. Efeito da época de irrigação sobre a produtividade do cafeeiro catuaí em 4 safras consecutivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 5. **Anais**. Araguari, p.144 -149. 2002.
- SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. **Manejo da irrigação do feijoeiro**: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central. Brasília: Embrapa - SPI, Circular Técnica, 2746p., 1994.
- SINGANDHUPE, R.B.; RAO, G.G.S.N.; PATIL, N.G.; BRAHMANAND, P.S. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop. **European Journal of Agronomy**, v.19, p.327-340, 2003.
- SNOECK, J. Essai d'irrigation du caféier robuste. **Café Caçõ Thé**, Paris, v.21, n.2, p.111-128, 1977.

SOARES, A.R.; MUDRIK, A.S.; SILVA, T.C.; MANTOVANI, E.C. Estudo sobre a utilização de distintas fontes de nitrogênio e potássio na produtividade dos cafeeiros irrigados e fertirrigados (resultado de três colheitas). In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3, Porto Seguro, **Anais**. 2003.

SOBREIRA, F.M. **Adubação do cafeeiro fertirrigado em fase de formação no sul de Minas Gerais**. 104p., 2010. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, MG., 2010.

SOUSA, V.F.; COELHO, E.F.; FOLEGATTI, M.V.; ARAÚJO, W.F.; ALENCAR, C.M. Efeito de diferentes doses de nitrogênio e potássio aplicados via água de irrigação no meloeiro amarelo. In: WORKSHOP DE FERTIRRIGAÇÃO, 1, Piracicaba. **Resumos**. Piracicaba: DER/Esalq/USP, p. 21-22, 1999.

SOUZA, T.R.; QUAGGIO, J.A.; SILVA, G.O. Dinâmica de íons e acidificação do solo nos sistemas de fertirrigação e adubação sólida na citricultura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.28, n.3, 2006.

TALLENS, J.A.M. **Riego Localizado Y Fertirrigación**. Madrid: Ediciones Mundi-prensa, 3. ed., 564p., 2002.

TIAN, D.; ZHANG, Y.; ZHOU, Y.; MU, Y.; LIU, J.; ZHANG, C.; LIU, P. Effect of nitrification inhibitors on mitigating N₂O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain. **Science of the Total Environment**, n.598: p.87-96, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.220> PMID: 28437775. Acesso em: 31 mar. 2021.

TONDELLO BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; VIEIRA LUCIANO, R.; PAZ GONZÁLEZ, A.; VIDA VÁZQUEZ, E. Teor de nitrogênio solúvel na água de erosão hídrica em cultura de aveia e ervilhaca em três formas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.439-446, 2009.

TVERDAL, A.; SELMER, R.; COHEN, J.M.; THELLE, D.S. Coffee consumption and mortality from cardiovascular diseases and total mortality: does the brewing method matter? **European Journal of Preventive Cardiology**, p.1-8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/2047487320914443>. Acesso em: 31 mar. 2021.

URQUIAGA, S.; SISTI, C.; SANTOS, H.P.; KOCHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Influence of crop rotation and soil tillage system in the organic C balance in an oxisol (Typic Haplorthox). In: CONGRESSO MUNDIAL DE CIÊNCIA DO SOLO, 17, Bangkok. **Resumos Expandidos**. Bangkok: Srimuang, 2002.

VICENTE, M.R.; MANTOVANI, E.C.; FERNANDES, A.L.T.; NEVES, J.C.L.; FIGUEREDO, E.M. Development and production of fertigated coffee trees in the West Region of Bahia, Brazil. **Coffee Science**, v.13, p.90-97, 2018.

VILELLA, W.M.C. **Diferentes lâminas de e parcelamento de adubação no crescimento, produtividade e qualidade dos grãos do cafeeiro (Coffea arabica L.)**. 95p., 2001. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

VILLA NOVA, N.A.; FAVARIN, J.L.; ANGELOCCI, L.R.; DOURADO NETO, D. Estimativa do coeficiente de cultura (Kc) do cafeeiro em função de variáveis climatológicas e fitotécnicas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, Vitória, **Resumos**. Brasília: Embrapa Café, p.582-591, 2001.

VILLAS BOAS, R.L.; ANTUNES, C.L.; BOARETTO, A.E.; SOUZA, V.F.; DUENHAS, L.H. Perfil da pesquisa e emprego da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). **Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, p.71-103, 2001.

VITTI, G.C.; HEIRINCHS, R. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão Holística. In: YAMADA, T.; STIPP, S.R.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e Enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, p.109-157, 2007.

VOLSI, B.; TELLES, T.S.; CALDARELLI, C.E.; CAMARA, M.R.G.D. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLoS ONE**, v.14, n.7, 2019; Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.02197>. Acesso em: 31 mar. 2021.

ZABINI, A.V.; CARVALHO, M.L.; BARBOSA, C.M. Adubação do cafeeiro com nitrogênio de liberação gradual em lavouras de primeiro ano na região das Matas de Minas, In: CONGRESSO BRASILEIRA DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 34, Caxambu. **Anais**. São Domingos das Dores: Fundação Procafé, p.226-227, 2008.

CAPÍTULO 21

21 IRRIGAÇÃO DE FRUTEIRAS TROPICAIS (ABACAXIZEIRO, BANANEIRA, MAMOEIRO E MANGUEIRA)

Eugênio Ferreira Coelho, Dionei Lima Santos e Welson Lima Simões

Resumo

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo. Sua produção em 2019 foi de 44 milhões de toneladas, com valor bruto de R\$ 38 bilhões; a área cultivada nesse período foi de 2,5 milhões de hectares, gerando 5 milhões de empregos com uma resposta a exportação anual média de 650 milhões de dólares (KIST *et al.*, 2018). Desta forma, a atividade apresenta-se como grande potencial de geração de emprego e renda e melhoria da qualidade de vida para a sociedade brasileira. Ainda há que se ressaltar que a produção de frutas é, também, fator importante no setor agroindustrial do Brasil. O aquecimento global e suas consequências na instabilidade climática podem afetar severamente a produtividade das culturas devido ao aumento da temperatura do ar e da evapotranspiração, somado à escassez de recursos hídricos nas regiões agrícolas tropicais (EDENHOFER *et al.*, 2014). Com isso, todas as fruteiras de maior ou menor consumo de água, com maior ou menor sensibilidade à deficiência hídrica, poderão ser afetadas pelos períodos secos na produtividade e na receita dos produtores. Tal fato, aliado à busca de produtos de melhor qualidade, ou mesmo à obtenção da produção em épocas de menor oferta do produto no mercado, justificam o aumento contínuo da irrigação na fruticultura brasileira. Este cenário tem acarretado aumento expressivo da demanda de conhecimentos relacionados à irrigação de fruteiras. Propõem-se, assim, neste capítulo, apresentar os principais conhecimentos científicos e tecnológicos relativos à irrigação das fruteiras tropicais de maior expressão comercial no país.

21.1 Introdução

As oscilações das disponibilidades hídricas nos sistemas de produção de fruteiras proporcionadas pelas mudanças climáticas, bem como a elevada concorrência dos frutos nos mercados nacionais e internacionais tem levado os sistemas de cultivo a serem avaliados pelas suas eficiências de uso da água (EUA), relacionando-se a produção de biomassa ou produção comercial a quantidade total de água aplicada ou evapotranspirada. Assim, técnicas e estratégias para aumentar a EUA, contribuem para melhoria da sustentabilidade das fruteiras.

A irrigação não funciona isoladamente num sistema de produção, ela deve estar integrada aos outros processos agropecuários, tais como adubação, correção da acidez do solo, controle fitossanitário, dentre outros. É necessário, também, o conhecimento dos sistemas de irrigação e suas relações com a cultura, bem como o conhecimento das necessidades hídricas das fruteiras, de aspectos ecofisiológicos e de estratégias de manejo da água de irrigação.

Os métodos de superfície, de aspersão e de irrigação localizada podem ser usados na maioria das fruteiras, sendo o de superfície o menos recomendado pelas maiores perdas de água proporcionadas. A adequação dos sistemas de aspersão ou localizada é, portanto, um ponto importante para o sucesso do empreendimento.

O manejo da água de irrigação requer conhecer o momento da irrigação, ou o limite de redução da água disponível do solo sem prejuízo da produtividade (umidade

ou potencial de água críticos), o que é feito por meio de sensores de água e requer determinar a quantidade de água a se repor ao solo para suprir essa redução. Essa quantidade de água pode ser calculada diretamente, pela lâmina correspondente à redução da água disponível do solo; ou pela evaporação do solo e transpiração das plantas (evapotranspiração) correspondente a esse período de depleção. Outra forma de se avaliar essas reposições é pela evapotranspiração e pela redução da água disponível de forma conjunta, que é o balanço de água na zona radicular.

No manejo da água de irrigação, as sugestões das umidades críticas para diferentes solos muitas vezes não são adotadas, seja pela dificuldade de equipamentos de leituras de umidade ou potencial de água do solo, seja pelas imprecisões consequentes das curvas de retenção de água do solo, feitas com pequenas amostras de solo que, pela variabilidade do mesmo, muitas vezes expressam valores de umidade-tensão que não representam as condições de campo. Quando os produtores não desejam usar a umidade crítica como indicador do momento da irrigação, optam por umidades maiores ou tensões de água do solo menores que os valores críticos, ou optam por intervalos entre irrigações fixos. Nesse caso, a frequência de irrigação é dada pela razão entre a lâmina real necessária à cultura ou a capacidade real de água do solo - CRA (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006) e a evapotranspiração correspondente ao tempo no qual a evapotranspiração máxima ou de referência apresenta baixo coeficiente de variação em relação à média do período. O intervalo entre irrigações (turno de rega) pode ser obtido pela equação 1, em que U_{cc} é a umidade do solo na capacidade de campo, U_c a umidade crítica do solo, ET_c a evapotranspiração da cultura e z_r a profundidade efetiva do sistema radicular.

$$TR = \frac{U_{cc} - U_c}{10 \cdot ET_c} \cdot z_r \quad (1)$$

A definição de quando irrigar determinada fruteira com base na relação solo-água-planta depende do quanto de depleção ou redução da água do solo a cultura tolera sem redução de produtividade que afete a receita líquida esperada pelo produtor. A umidade ou potencial de água do solo correspondente ao limite superior da água disponível é tomada normalmente como equivalente àquela que deve ser atingida no solo após cada irrigação e que proporciona produtividade potencial às culturas.

O uso de métodos de manejo da água de irrigação com uso da evapotranspiração associada aos coeficientes de cultura e de localização (fração da área molhada) isoladamente ou em conjunto com a avaliação do estado hídrico do solo (balanço de água na zona radicular) são usados em todas as fruteiras. Os métodos ou estratégias que envolvem irrigação com *deficit* regulado (RDI) e o secamento parcial da zona radicular (PRD) têm apresentados resultados positivos para diversas fruteiras e constituem solução para mitigar as perdas de áreas plantadas ou perdas de produtividade em épocas de secas prolongadas, cada vez mais comuns atualmente, e em cenários futuros, devido às mudanças climáticas em curso.

A facilidade cada vez maior de acesso a novas tecnologias como de câmeras de alta resolução, de infravermelho ou próximo do infravermelho, adaptadas em drones ou em satélites, tem sido usada em monitoramento de culturas, inclusive fruteiras, com objetivo de determinar o estado hídrico das mesmas, a partir de imagens dos índices da vegetação NVDI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) (BRITO *et al.*, 2015). Algumas fruteiras como abacaxizeiro e mamoeiro já possuem alguma informação, entretanto nem todas ainda foram estudadas quanto ao uso dessas imagens para fins de avaliação do estado hídrico das plantas. A tecnologia tende a ser avaliada e aprimorada para essa finalidade.

Esse capítulo objetiva apresentar as informações sobre a irrigação das fruteiras tropicais mais relevantes dentre as irrigadas no agronegócio, tendo o manejo da água de irrigação como foco, dada a necessidade de aumento da eficiência do seu uso para o presente e o futuro, da sustentabilidade dos recursos hídricos, não somente para a irrigação, como também para os demais setores da sociedade.

21.2 Irrigação do abacaxizeiro (*Ananas comosus*)

21.2.1 Produtividade e ciclo

O abacaxizeiro é considerado uma das quatro fruteiras mais plantadas no Brasil. Sua produtividade média tem variado de 24 a mais de 26 toneladas por hectare. As exportações têm trazido receitas na ordem de 700 mil a 2 milhões de dólares para fruta fresca e na ordem de 4 a 26 milhões de dólares para suco. O aquecimento global e suas consequências na instabilidade climática têm intensificado o aumento da frequência dos períodos secos, afetando negativamente a produtividade e a receita dos produtores, mesmo sendo o abacaxizeiro uma cultura de menor consumo de água.

O ciclo do abacaxizeiro pode variar de 12 a 24 meses (CARVALHO *et al.*, 2005), podendo chegar 30 meses (KIST *et al.*, 2011), conforme as condições ambientais e de temperatura (22-32°C). A irrigação favorece a antecipação da floração natural, bem como a colheita (ALMEIDA *et al.*, 2002). Assim, o cultivo do abacaxizeiro irrigado torna-se uma estratégia de mercado, pois o abacaxicultor pode fazer a indução floral da sua lavoura em períodos pré-estabelecidos, buscando sempre os períodos de entressafra em algumas regiões, ou com melhores preços. Além disso, os produtores de abacaxi irrigado devem evitar que a colheita ocorra na mesma época em que se dá a colheita do abacaxi cultivado sob sequeiro, que também apresenta uma boa qualidade e aceitação nos mercados consumidores do Brasil.

21.2.2 Sistemas de irrigação

Os sistemas de irrigação pressurizados são os mais utilizados nas áreas irrigadas com abacaxizeiro, desde aqueles do método da irrigação localizada bem como do método de aspersão. As indicações são de que os sistemas de aspersão são os mais recomendados para a cultura. As justificativas para essa afirmação estão embasadas na forma de calha das folhas que direcionam a água para o sistema radicular, em que as raízes adventícias respondem por mais de 50% do total das raízes da planta. Os sistemas de aspersão convencional e o mini autopropelido (Figura 1A) são muito utilizados na irrigação do abacaxizeiro, pelo menor custo comparado ao pivô central e aos sistemas de irrigação localizada. O pivô central com tubos de descida próximo da altura da planta e com controle de pressão nos aspersores é o que possui maior eficiência de irrigação em áreas irrigadas com abacaxizeiro. O sistema autopropelido e aspersão convencional possuem eficiência de aplicação da menor mediana entre 60 a 75% e 70-85%, respectivamente (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O sistema de irrigação localizada mais usado na irrigação do abacaxizeiro é o gotejamento, principalmente em plantios de maior adensamento, com o uso de fileiras duplas, tipo 0,90 m x 0,40 m x 0,40 m, ou espaçamentos próximos. Normalmente, utiliza-se uma linha lateral de gotejadores entre duas fileiras simples. Pode-se, também, trabalhar com uma linha lateral entre fileiras com espaçamento de até 0,50 m, no caso de solo com textura média a argilosa. A linha lateral deve possuir emissores espaçados de 0,30 m, com vazão entre 1,5 e 2,0 L h⁻¹, sendo que quanto mais arenoso o solo, menor deve ser a vazão do emissor. O uso da cobertura sintética do solo (*mulching*) no

cultivo do abacaxizeiro sob gotejamento contribui para o aumento da eficiência de irrigação (90%) e da eficiência do uso de água das plantas, principalmente pela redução da evaporação do solo. Além disso, haverá uma redução nos custos com mão de obra de limpeza da área ou com aplicações herbicidas ao longo do ciclo produtivo do abacaxizeiro. Por outro lado, o uso da cobertura sintética apresenta a desvantagem do aumento do custo de produção e a dificuldade de reutilização dessa cobertura em sucessivos plantios.

O uso do gotejamento enterrado ou subsuperficial é uma alternativa que contribui significativamente no aumento da eficiência de irrigação e no uso de água pela cultura. As perdas por evaporação, que já são reduzidas no sistema por gotejamento quando comparado a outros sistemas de irrigação, tornam-se ainda menores com o sistema subsuperficial. O uso do sistema subsuperficial envolve linhas laterais de fita ou tubo gotejador com emissores no mesmo espaçamento do sistema por gotejamento superficial, com vazão abaixo de $2,0 \text{ L h}^{-1}$, instalados entre 0,10 e 0,20 m, dependendo do tipo de solo. A profundidade pode ser maior em solos argilosos e menor em solos arenosos, levando sempre em consideração a faixa de profundidade recomendada. É necessário ater para o fato de que pode ocorrer intrusão radicular nos emissores. As linhas de irrigação com emissores tipo *'in line'* ou embutidos já são vendidas com propriedades repelentes a raízes.

Na irrigação do abacaxizeiro por microaspersão, necessita-se de hastes (Figura 1B) maiores do que as normalmente utilizadas em outras culturas, pois os emissores devem ficar acima das plantas. Além disso, os microaspersores devem ser espaçados de forma que permita uma sobreposição dos jatos entre as linhas laterais para manter a uniformidade de distribuição das lâminas de água, o que vai depender do seu raio de alcance.



Figura 1. (A) Mini autopropelido sendo utilizado na irrigação do abacaxizeiro, e (B) Haste de elevação do emissor em uma área irrigada de abacaxizeiro com sistema de microaspersão.

21.2.3 Necessidades hídricas do abacaxizeiro

O abacaxizeiro é uma fruteira que utiliza o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM). A planta abre os estômatos durante a noite e absorve o CO_2 , transformando-o em ácido málico; esse, então, é armazenado nos vacúolos durante a noite e, na presença da luz, é transportado para fora do vacúolo, voltando à forma de CO_2 , sendo fixado pela RuBisco na fotossíntese. A elevação de sua concentração na folha acarreta

o fechamento dos estômatos durante o dia, até meado da tarde (CARR, 2012), conforme o comportamento da condutância estomática ou transpiração (Figura 2). Nesse período a transpiração é mínima, o que demonstra que o abacaxizeiro possui, naturalmente, uma elevada eficiência de uso de água. O abacaxizeiro também possui tecidos armazenadores de água, com potencial osmótico próximo de -1 MPa que permite perdas elevadas de água (CARR, 2012).

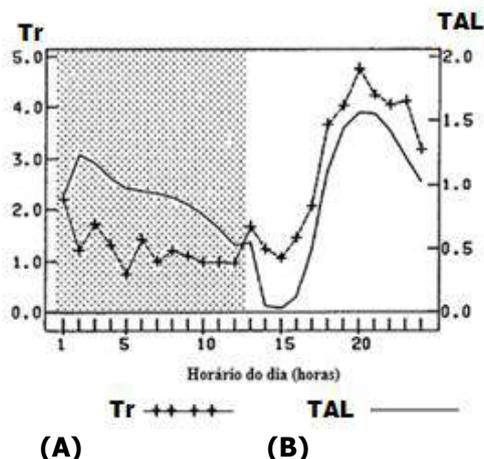


Figura 2. Transpiração (Tr , $\text{mL planta}^{-1} \text{h}^{-1}$) e taxa assimilatória líquida (TAL , $\text{mmol planta}^{-1} \text{h}^{-1}$) das plantas de metabolismo CAM durante (A) a noite e (B) o dia (COTE *et al.*, 1992).

As plantas CAM absorvem água e transpiram na maior parte do tempo à noite. Entretanto, o uso da irrigação pode induzir o abacaxizeiro a se comportar como planta C_3 de forma parcial, com predominância da fixação do CO_2 durante o dia em quase todo o ciclo da cultura (SAN-JOSE *et al.*, 2007). Outra evidência dessa alteração do comportamento da cultura foi verificada em pesquisas conduzidas no Nordeste, onde a evapotranspiração foi mínima durante a noite e apresentou um comportamento crescente no turno da manhã e decrescente no turno da tarde (AZEVEDO *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2008). O comportamento do abacaxizeiro como planta CAM pode ser confirmado na literatura por trabalhos de avaliação de lâminas ou volumes de água na produtividade da cultura que não detectaram efeito das lâminas aplicadas no peso médio dos frutos ou na produtividade desses (FRANCO *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2009); ou com possibilidades de comportar-se como C_3 , com resposta da produtividade ou peso médio dos frutos aos níveis de água aplicados (MELO *et al.*, 2006).

A necessidade hídrica do abacaxizeiro durante seu ciclo produtivo varia conforme as condições climáticas locais, sistema de irrigação utilizado, uso ou não de cobertura do solo e o cultivar plantado. Os cultivares de abacaxizeiro mais avaliados em estudos sobre as necessidades hídricas tem sido a "Pérola" e a "Smoth Cayene". O uso do *mulching* sintético reduz significativamente a evaporação, diminuindo assim a evapotranspiração e o coeficiente de cultura, principalmente nos primeiros meses, quando a evaporação prevalece na evapotranspiração. Da mesma forma, o sistema de irrigação por gotejamento tende a contribuir ainda mais na redução do uso de água na cultura.

O consumo de água na irrigação do abacaxizeiro durante o ciclo reflete basicamente na evapotranspiração da cultura, cujos valores sugeridos variam de 1,3 a 5,0 mm dia^{-1} (HANAFI *et al.*, 2010); 2,9 a 4,2 mm dia^{-1} (SANTANA *et al.*, 2013); 3,5 a 4,7 mm dia^{-1} (AZEVEDO *et al.*, 2007), onde os maiores valores se referem aos primeiros cinco meses da cultura. As necessidades estão na faixa de 600 mm (EVANS *et al.*, 2002;

HEPTON, 2003). Há regiões com plantio do abacaxizeiro em condições de sequeiro, onde as precipitações são mais elevadas, com volumes acumulados de 1000 a 1500 mm/ano e chuvas bem distribuídas (CARVALHO, 1998; HUANG; LEE, 1969).

Na fase inicial do abacaxizeiro, correspondente aos dois primeiros meses após o plantio, as raízes das plantas ocupam pequenas profundidades do solo, onde a evaporação do solo ocorre com mais intensidade no perfil. Com isso, apesar das plantas não requererem maiores quantidades de água, é necessário irrigações com maior frequência para manter a camada mais superficial do solo com umidades próximas à capacidade de campo. Do segundo ao quinto mês, em condições em que o solo não se encontra coberto, a evaporação da água do solo ainda é predominante na evapotranspiração. A maior demanda de água pela cultura ocorre nessa fase (AZEVEDO *et al.*, 2007). Nos demais meses a cultura tende a cobrir toda a área, principalmente em cultivos mais adensados, e não ocorre diferença na demanda hídrica da cultura inclusive na fase de formação do fruto (AZEVEDO *et al.*, 2007; COMBRES, 1983), sendo que essa demanda é inferior à que ocorre até o quinto mês (AZEVEDO *et al.*, 2007). Na fase de colheita ocorre uma redução na demanda hídrica em relação às fases anteriores. Esse comportamento da cultura quanto à necessidade de água é confirmado pela taxa de crescimento relativo da cultura (Figura 3) onde a maior taxa de crescimento ocorre, em média, aos 90 dias após o plantio, a partir de quando reduz de forma constante até o período de floração (LIMA, 2021).

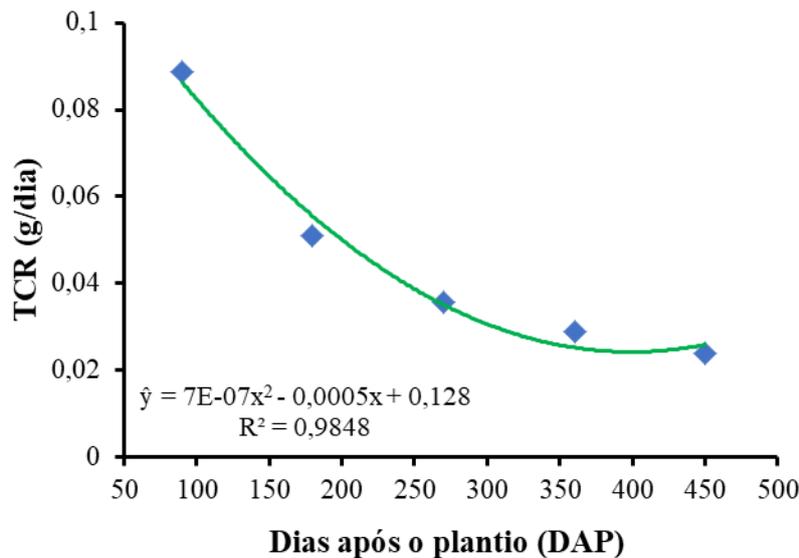


Figura 3. Taxa de crescimento relativo (TCR, g dia⁻¹) do abacaxizeiro (cultivar BRS Imperial) nas condições de Tabuleiros Costeiros da Bahia (LIMA, 2021).

Em termos quantitativos, para efeito de cálculos da lâmina de água necessária pelas plantas, o coeficiente de cultura (k_c) é o imprescindível. O coeficiente de cultura expressa às controvérsias quanto à necessidade de água do abacaxizeiro durante seu ciclo. O abacaxizeiro sendo uma cultura CAM, com baixa transpiração diária, induz a uma baixa evapotranspiração e, conseqüentemente, um baixo coeficiente de cultura. Em alguns trabalhos foram apresentaram resultados que atestam a baixa evapotranspiração da cultura (SANTANA *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2006; ALLEN *et al.*, 1998), enquanto em outros (SANTANA *et al.*, 2013; AZEVEDO *et al.*, 2007; SOUZA; REINHARDT, 2007) os valores de k_c não condizem com baixa evapotranspiração, o que poderia levantar a questão do comportamento da cultura como planta C3, o que não foi mencionado nos trabalhos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes de cultura para o abacaxizeiro em diferentes fases do ciclo da cultura por diferentes autores.

Autores	Fase vegetativa	Fase floração	Fase cresc. de frutos	Fase colheita
Azevedo <i>et al.</i> (2007)	0,89±0,07	0,88±0,09	0,87±0,05	0,89±0,01
Souza e Reinhardt (2007)	0,40-0,60	1,00-1,20	1,00-1,20	0,40-0,60
Santana <i>et al.</i> (2013) ^{1,2}	0,60-0,73	0,62	0,90	0,90
Santana <i>et al.</i> (2013) ^{1,3}	0,57-0,66	0,56	0,71	0,71
Melo <i>et al.</i> (2006)	0,57	0,57	0,57	0,57
Allen <i>et al.</i> (1998) ⁴	0,50	0,30	0,30	0,30
Allen <i>et al.</i> (1998) ⁵	0,50	0,50	0,50	0,50

¹ Gotejamento. ² Superficial. ³ Subsuperficial. ⁴ Com cobertura do solo. ⁵ Sem cobertura do solo.

21.2.4 Manejo da água de irrigação em abacaxizeiro

A definição do momento de irrigar a cultura do abacaxizeiro com base na relação solo-água-plantas considera a não influência dos níveis de água aplicados à cultura detectados nas pesquisas e o comportamento referente ao mecanismo ácido das crassuláceas, que permite uma redução maior do nível de água que maximiza a produtividade, em relação às demais culturas. A redução de 50% da água disponível do solo já mencionada (ALMEIDA *et al.*, 2002) pode ser usada, uma vez que a literatura não disponibiliza valores dessas reduções. A umidade crítica, nesse caso, como indicador do momento da irrigação dependerá do tipo de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Umidade crítica para o abacaxizeiro para solos de diferentes classes texturais.

Classificação textural	Umidade capacidade de campo (m³ m⁻³)	Umidade ponto de murcha (m³ m⁻³)	Umidade crítica (m³ m⁻³)
Arenosa	0,1700	0,0847	0,1310
Franco-arenosa	0,2094	0,0807	0,1451
Franco	0,3156	0,1033	0,2095
Franco-Argilo-Siltoso	0,3400	0,1900	0,2650
Argila	0,3600	0,2555	0,3050

O manejo da água de irrigação do abacaxizeiro irrigado por sistemas de aspersão convencional deve considerar um turno de rega fixo e, este, por sua vez, vai depender do tipo solo e da evapotranspiração média da cultura no período conforme sugerido na Tabela 3. Entretanto, o turno de rega pode ser diferente conforme o comportamento da cultura e o regime de umidade do solo, o que é verificado pelas leituras de umidade ou de potencial de água do solo.

O cálculo do tempo de irrigação ou a razão entre a lâmina total (mm) e a intensidade de precipitação do aspersor (mm h⁻¹), deve considerar na lâmina real necessária (CRA) e a profundidade efetiva do sistema radicular de 0,15 m até 90 dias

após o plantio (DAP), 0,20 m de 90 a 180 DAP e 0,25 m no restante do ciclo, com base na avaliação de crescimento de raízes de Lima (2021). Se o manejo for com uso da reposição da evapotranspiração da cultura ou pelo balanço de água na zona radicular, deve-se considerar as profundidades do sistema radicular sugeridas.

Tabela 3. Valores do intervalo em dias entre irrigações para o abacaxizeiro considerando diferentes evapotranspirações médias da cultura e tipos de solo.

Textura do solo	Evapotranspiração da cultura (mm dia ⁻¹)				
	2	3	4	5	6
Arenoso	4	3	2	2	1
Franco-arenosa	6	4	3	3	2
Franco	11	7	5	4	4
Franco-argilo-siltoso	8	5	4	3	3
Argila	6	4	3	2	2

O manejo da água em sistemas de irrigação localizada também pode usar o turno de rega fixo, o que torna mais prático e operacional. Nesse caso, onde a área molhada pelos emissores é menor em relação à área molhada na aspersão o turno de rega deve variar de 1 dia (solos arenosos) a 3 dias (solos de textura argilosa) em plantios sem cobertura do solo. O uso de cobertura sintética do solo no gotejamento requer o uso de sensores de umidade ou de tensão de água para determinar o momento de irrigar bem como quantificar a lâmina a ser aplicada na irrigação. O abacaxizeiro reduz significativamente a evapotranspiração principalmente nos primeiros meses após o plantio, quando cultivado sob cobertura do solo. Nesse caso, toda a água que seria evaporada sem a cobertura permanece armazenada, reduzindo a taxa de secagem do solo. Espera-se manter o solo com umidades continuamente próximas do limite superior da água disponível (capacidade de campo), mas com a cobertura sintética do solo é preciso cautela para não manter o solo com excesso de umidade. O cálculo do tempo de irrigação, se feito com base na evapotranspiração, deve considerar o coeficiente de cultura de 0,3 (Tabela 1).

Qualquer sensor que seja usado para avaliação da umidade do solo (tensiômetro, blocos de resistência elétrica de matriz granular, sondas TDR, sondas de capacitância) deve ser colocado na posição de maior concentração de raízes e de maior incidência de absorção de água pelo sistema radicular. O sistema radicular do abacaxizeiro nas condições subúmidas sob irrigação por gotejamento em faixa contínua, com e sem cobertura sintética, possui 64 e 65% de raízes adventícias, entre 18 e 23% de raízes na camada de 0 a 0,10 m, entre 7 e 2% na camada de 0,20 a 0,30 m, e 9% na camada de 0,10 a 0,20 m tanto com, como sem cobertura do solo (LIMA, 2021). A instalação de sensores para determinação da água disponível no solo deve ser a 0,10 m de profundidade e 0,10 m entre a planta e o gotejador, no caso da linha lateral entre duas fileiras de plantas.

O abacaxizeiro, por ser planta CAM, tem elevada eficiência de uso de água (EUA), uma vez que a fotossíntese ocorre durante períodos diurnos de elevada temperatura e sob mínima transpiração. A eficiência de fixação de CO₂ pela transpiração em plantas CAM chega a três vezes a eficiência em plantas C₄ e a seis vezes a eficiência em plantas C₃ (BORLAND *et al.*, 2009). Os valores de EUA obtidos em pesquisas variam de 5,6 kg [frutas] m⁻³ (AZEVEDO *et al.*, 2007) a 11 kg [frutas] m⁻³ (SAN-JOSÉ *et al.*, 2007),

valores dentro ou próximo dos propostos por Doorembos e Kassam (1979), entre 5,0 a 10,0 kg de frutas m⁻³.

21.2.5 Indicadores do estado hídrico no abacaxizeiro

O estado hídrico do abacaxizeiro irrigado pode ser expresso por meio de indicadores destrutivos (conteúdo relativo de água - CRA, da folha "D") e não destrutivo ("Normalized Difference Vegetation Index" - NDVI ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; e "Stress Degree Day - SDD" ou Dia de Grau de Estresse). O Dia de Grau de Estresse (SDD) baseia-se nas diferenças de temperatura entre o dossel da cultura e o ambiente, considerando que sob condições de estresse hídrico, as plantas fecham os estômatos e diminuem a transpiração, aumentando, assim, a temperatura das folhas em relação à temperatura do ar (KIRKHAM, 2005). Na estação fria, o abacaxizeiro 'Smooth Cayenne' cultivado com e sem irrigação, apresentou diferenças significativas do NDVI após 45 dias de restrição hídrica, enquanto que na estação quente, o CRA apresentou diferenças após uma semana do início da restrição hídrica (RÍOS *et al.*, 2020). Ainda nesse estudo, o SDD foi o índice mais sensível, uma vez que aumentou nas duas estações e apresentou diferenças significativas nas fases iniciais. Outra fonte de informação sobre o estado hídrico do abacaxizeiro são as imagens termais, conforme apresentado na Figura 4, em que após 75 dias de cultivo com e sem irrigação, a temperatura do dossel do abacaxizeiro medida às 12 horas durante a estação fria, em média, foi de 20°C para as plantas sob irrigação (Figura 4a) e 29 °C para as plantas cultivadas sem irrigação (Figura 4b). Durante a estação quente, a temperatura das plantas com irrigação foi de 38°C (Figura 4c) e sem irrigação foi de 48 °C (Figura 4d).

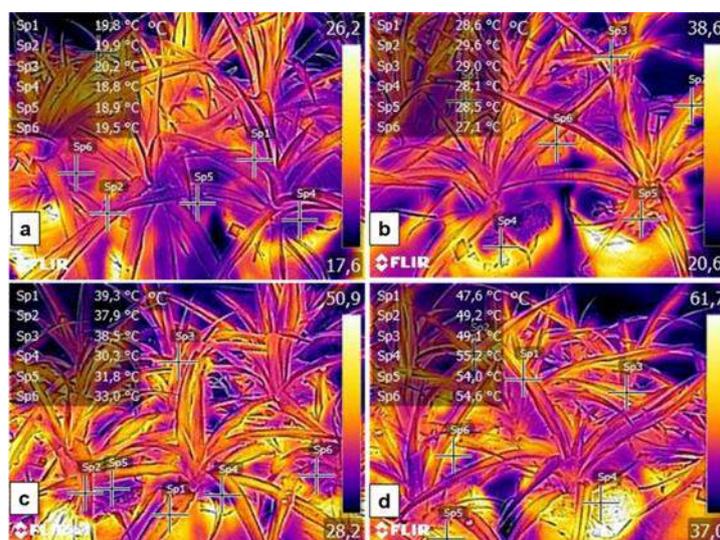


Figura 4. Imagens térmicas de plantas de abacaxizeiro cultivadas sob irrigação (a) e sem irrigação (b) no final da estação fria; e plantas de abacaxizeiro cultivadas sob irrigação (c) e sem irrigação (d) no final da estação quente (RÍOS *et al.*, 2020).

21.3 Irrigação da bananeira (*Musa spp.*)

21.3.1 Área e produção

A bananeira é segunda fruteira com maior área (450 a 490 mil hectares) e produção (entre 6,6 e 7,2 milhões de toneladas) do país, sendo a que apresenta o maior número de produtores envolvidos com a cultura. As regiões do Nordeste e Sudeste são as mais produtoras de banana, com maior expansão de área e produção nos polos de

fruticultura irrigada dessas regiões. As regiões Sul, Nordeste e Sudeste são as que mais exportam (KIST *et al.*, 2018). A bananeira, pelo fato de ser uma cultura exigente em água, induz aos produtores a preocupação de manter o solo com umidade elevada, o que implica em perdas, especialmente por percolação profunda. A irrigação dessa cultura deve, portanto, ser embasada nas suas particularidades, dentro das variações ambientais, e ser avaliada dentro do sistema de produção da mesma, considerando-se aspectos dos sistemas de irrigação, do espaçamento da cultura, dos seus tratamentos culturais e do controle fitossanitário.

21.3.2 Sistemas de irrigação para bananeira

O método da aspersão convencional promove uma irrigação em toda a área, isto é, mantém a área molhada em 100%. A zona radicular da bananeira que mais extrai água do solo se encontra no raio de 0,60 m da planta. Essa região do solo, até a profundidade de 0,40 a 0,50 m, é onde as raízes extraem em torno de 80% do total de água utilizada pela planta, não diferindo entre a aspersão convencional e a irrigação localizada (SANT'ANA *et al.*, 2012). A área molhada total do solo pela aspersão não aumenta significativamente a produtividade da bananeira, quando comparada aos sistemas de irrigação localizada. Entretanto, resulta em perda significativa de água no solo fora da zona mais ativa do sistema radicular. Na irrigação da bananeira por aspersão convencional, utiliza-se aspersores de baixa pressão e que devem ficar até 1 m acima do solo, com ângulo de inclinação no máximo de 9 graus.

A irrigação localizada exige um procedimento que deve ser feito no bananal, que é manter o alinhamento das fileiras de plantas, desde a fase vegetativa, mantendo todas as plantas filhas na mesma disposição, de forma que a mudança de posição da planta ativa seja a mesma em todas as touceiras. Esse procedimento assegura a uniformidade da aplicação de água na cultura. Os emissores de água que dão nome aos sistemas de irrigação localizada são os microaspersores, gotejadores, microjatos, microtubos, além de outros.

O gotejamento é mais adequado a solos de textura média a argilosa, sendo um sistema de maior eficiência que a microaspersão, com menor dispêndio de água. Em condições subúmidas ou úmidas, uma linha lateral por fileira de plantas é suficiente para garantir produtividades. No semiárido, no entanto, são necessárias duas linhas laterais de irrigação por fileira de plantas. Dois ou três gotejadores espaçados de 0,40 a 0,50 m entre si, por planta ao longo de uma linha lateral por fileira de plantas são suficientes para a cultura em condições úmidas e subúmidas. Em condições semiáridas deve-se usar quatro a seis gotejadores por planta nos mesmos espaçamentos distribuídos nas duas linhas laterais. O gotejamento, pela disposição dos emissores na região de concentração das raízes da bananeira, contribui para maior crescimento inicial das plantas em relação à microaspersão.

A microaspersão favorece a fase de produção da cultura, mais do que o gotejamento. As produtividades no sistema de gotejamento considerando duas linhas laterais por fileira de plantas com emissores distantes 0,40 a 0,50 m entre si podem ser equiparar às obtidas na microaspersão. Em pomares com espaçamentos entre plantas de 3,0 m x 2,0 m ou 3,0 m x 2,5 m, os microaspersores devem ter vazões entre 50 e 70 L/h, devido ao raio de ação do emissor ser entre 3,0 m e 3,5 m. Pode-se usar microaspersores de vazão entre 40 e 50 L/h ou até 60 L h⁻¹ para espaçamentos entre plantas mais adensados como 2,5 m x 2,0 m. Os microaspersores podem ser dispostos um para quatro plantas ou espaçados entre si na linha lateral de 3,5 a 4,5 m. Os sistemas de microaspersão, conforme a vazão do emissor e o espaçamento entre plantas favorecem melhores condições de umidade na zona radicular do que o

gotejamento. O gotejamento, quando sob uso de faixa contínua, com emissores dispostos ao longo de duas linhas laterais por fileira de plantas, contribuem para produzir tanto quanto ou mais que a microaspersão, a depender da vazão dos emissores (SANTANA JÚNIOR, 2012).

21.3.3 Necessidades hídricas da bananeira

As variedades de bananeiras mais cultivadas no Brasil são do grupo genômico AAA, subgrupo Cavendish, genótipos Grand, Naine, Nanica, Williams; do grupo AAB, subgrupo Pome, genótipos Prata, Prata Anã, Prata Gorutuba, Prata Catarina e subgrupo Maçã, Yangambi número 2, com a Maçã, BRS Tropical e a BRS Princesa, sendo todos os genótipos pouco tolerantes a estresses hídricos. São genótipos cujas raízes se concentram nas camadas mais próximas da superfície do solo, onde as perdas de água por evaporação são maiores, não suportando longos períodos sem água de chuva ou irrigação (RAVI *et al.*, 2013). Os tetraploides AAAB, por exemplo, 'BRS Platina', 'BRS Tropical' e 'BRS Princesa' expressam tolerância intermediária a estresse hídrico do solo (COELHO *et al.*, 2015).

Os cultivares de bananeira apresentam diferenças na resposta à aplicação de água, isto é, pode haver maior ou menor diferença entre a necessidade hídrica desses cultivares. Quanto à resposta a aplicação de água, levando em consideração a medida da taxa de variação da produtividade em função do volume de água aplicado, o cultivar Grande Naine do subgrupo Cavendish apresenta maior taxa ou responde mais a aplicação de água que os genótipos do subgrupo Pome. O cultivar BRS Princesa, híbrido de Yangambi, tipo maçã, apresenta baixa taxa de variação da produtividade em relação à aplicação de água (COELHO *et al.*, 2015).

A demanda de água da bananeira varia com o cultivar, com a fase fenológica dessa e com as condições meteorológicas que determinam a evapotranspiração máxima ou de referência (ET_o). Um mesmo cultivar pode necessitar de um maior ou menor volume de água em seu ciclo, dependendo principalmente das condições meteorológicas e da cultura durante o ciclo. Quanto maior ou menor a evapotranspiração máxima ou de referência decorrente da radiação líquida, da temperatura relacionada à umidade relativa e da velocidade do vento, associada à resistência aerodinâmica do genótipo, vai haver uma necessidade maior ou menor de água, respectivamente, durante seu ciclo. Os genótipos de bananeira podem usar entre 600 mm a mais de 2000 mm de água, dependendo da ET_o durante o ciclo e do comprimento desse (COELHO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2007; COELHO *et al.*, 2006; TEXEIRA *et al.*, 2002).

A bananeira apresenta três fases de distintas taxas de aumento de sua massa seca (ARAÚJO, 2008), que indiretamente reflete suas necessidades hídricas. Até o quarto ou sexto mês do plantio, quando apresenta diferentes comportamentos quanto à transpiração; do quinto ou sétimo mês, até 60 dias da emergência da inflorescência, quando a bananeira apresenta a maior área foliar total (TURNER; FORTESCUE; THOMAS, 2010); e a partir daí até o final do crescimento dos frutos. Na primeira fase, a demanda hídrica da cultura é menor que na segunda. O vigor e o crescimento das plantas na segunda fase dependem da primeira, quando o sistema radicular é limitado e a necessidade de aporte hídrico é elevado devido à predominância da evaporação do solo na evapotranspiração. Com isso, a primeira fase requer manutenção da umidade na camada de 0-0,25 m próxima à capacidade de campo.

Nos dois primeiros meses após o plantio, a irrigação por microaspersão requer maiores tempos de irrigação, comparado aos demais meses da primeira fase, devido à baixa uniformidade de distribuição local do microaspersor em relação ao sistema

radicular das plantas. A deficiência hídrica no quinto ou sexto mês, até próximo de 60 dias da emissão da inflorescência, influencia na taxa de emissão, no crescimento foliar, no período da iniciação floral, na floração, no número de pencas e na produção de cachos (TURNER; FORTESCUE; THOMAS, 2010; ROBINSON; GALÁN SAÚCO, 2010). A partir desse período que antecede a floração até o final de crescimento dos frutos, a necessidade hídrica aumenta em relação à fase anterior numa taxa constante, com ligeiro aumento nos 60 dias que antecedem o crescimento máximo dos frutos. O aumento da demanda hídrica após a emergência da inflorescência se deve, principalmente, ao crescimento dos frutos.

O manejo da água de irrigação da bananeira requer o uso de indicadores da necessidade hídrica de forma a quantificar o volume de água requerido. A evapotranspiração de um genótipo de bananeira requer o coeficiente médio dessa cultura, sendo esse um indicador da necessidade hídrica da bananeira durante seu ciclo. A literatura mostra diversos valores de coeficiente de cultura médios (K_{cm}) para a bananeira: para a região do Polo Petrolina-Juazeiro os valores de K_{cm} ficaram entre 0,6 e 1,1 e entre 1,1 e 1,3 nos primeiro e segundo ciclo, respectivamente (TEIXEIRA *et al.*, 2002; BASSOI *et al.*, 2004). Nas condições da Chapada do Apodi, os valores de K_c no início (K_{cin}), meio (K_{cmid}) e final (K_{cfinal}) do ciclo foram de 1,09; 1,21 e 0,71 respectivamente (COSTA, 2009). Mesmo fora do Brasil, os valores de K_c permaneceram nas mesmas faixas citadas, tanto para condições tropicais como subtropicais (CARR *et al.*, 2009). Esses diversos valores de K_{cm} indicam que os coeficientes sugeridos por Doorembos e Kassam (1994) são adequados para os genótipos mais cultivados dos subgrupos Cavendishe e Pome (Tabela 4). O coeficiente de cultura dual, que envolve o coeficiente basal (K_{cb}), considera a evapotranspiração com predominância da transpiração da planta, isto é, com a superfície do solo seca e o coeficiente de evaporação (K_e). O K_e considera a evaporação predominante, imediatamente após a irrigação e, para efeito de aumento da eficiência de uso de água das plantas, é mais indicado (Tabela 5). Esses coeficientes demonstram as taxas de aumento da necessidade de água pela bananeira com estabilidade no máximo da necessidade na fase de crescimento de frutos.

Tabela 4. Coeficientes de cultura médios (K_{cm}) recomendados para a bananeira no primeiro ciclo de produção (DOOREMBOS; KASSAN, 1994).

Meses após o plantio (Primeiro ciclo de produção)											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,40	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,10	0,90	0,80

A evapotranspiração (ET_c) para a irrigação por aspersão considera apenas o K_{cm} conforme as Tabelas 4 e 5, entretanto na irrigação localizada, a ET_c deve ser corrigida em função da área efetivamente molhada, o que pode ser feito considerando a fração da área molhada (KELLER; BLIESNER, 1990) ou pelo coeficiente de localização (K_L) (Tabela 6).

Tabela 5. Coeficientes de cultura basal (Kcb) para dois ciclos de produção da bananeira (ALLEN *et al.*, 1998).

Ano (ciclo)	Coeficientes de cultura basal (Kcb)		
	Fase inicial	Fase de crescimento máximo dos frutos	Fase de estabilização do crescimento dos frutos
1	0,15	1,05	0,9
2	0,6	1,10	1,05

Tabela 6. Equações para determinação do coeficiente de ajuste (K_L) da evapotranspiração.

Equação	Fonte
Se $Ps \geq 0,65 \rightarrow K_L = 1,0$	Feres (1981)
Se $0,20 < Ps < 0,65 \rightarrow K_L = 1,09 Ps + 0,3$	
Se $Ps \leq 0,20 \rightarrow K_L = 1,94 Ps + 0,10$	
$K_L = 0,1\sqrt{Ps}$	Keller e Bliesner (1990)

Ps - fração de área molhada ou sombreada, prevalecendo o maior valor.

A evapotranspiração obtida com uso do coeficiente de cultura é o indicador mais em uso para quantificar a necessidade atual de água dos genótipos de bananeira e depende, principalmente, da condutância estomática que, por sua vez, é influenciada pela radiação líquida, pelo *deficit* de pressão de vapor e pela água disponível do solo. A ETc dessa forma integra o estado da planta e do solo na quantificação do volume de água necessário às plantas.

21.3.4 Manejo da água de irrigação

O manejo da água de irrigação da bananeira tem sido feito com (i) uso de métodos relativos à redução da disponibilidade de água do solo, com instrumentos de medição de umidade e de potencial da água do solo; (ii) com uso de dados para determinação da evapotranspiração da cultura, (iii) com uso dos dados do balanço de água na zona radicular, que envolve os dois métodos anteriores. Para a bananeira, apesar da disponibilização dessas ferramentas a determinação do estado hídrico das mesmas, com uso a partir de imagens dos índices da vegetação NVDI e SAVI (BRITO *et al.*, 2015), as informações estão ainda em fase inicial como, por exemplo, a determinação da condição hídrica das plantas pelas folhas mais novas (LEVANON *et al.*, 2015).

O uso de sensores de água no solo precisa da definição da umidade ou do potencial de água do solo referente à redução da água disponível do solo. No caso da bananeira, o limite para a redução é de 30% da água disponível, isto é, a umidade crítica é resultante da diferença da umidade na capacidade de campo é de 30% da água disponível. Essa umidade ou potencial deve ser obtida da curva característica de retenção de água do solo, mas na ausência dessa pode-se utilizar, a princípio, os valores apresentados na Tabela 7 fazendo ajustes posteriormente conforme o crescimento das plantas.

O produtor pode antecipar a irrigação ou diminuir a percentagem de redução da água disponível para 20 ou 25%. As informações das umidades ou potencial de água no solo críticos também são usados para definição da frequência de irrigação (Tabela 8) para os sistemas de aspersão convencional ou mini aspersão.

Tabela 7. Umidade e tensão crítica de solos de diferentes classes texturais para a cultura da bananeira (COELHO *et al.*, 2012).

Classificação Textural	Umidade CC ¹ (m ³ m ⁻³)	Umidade PMP ² (m ³ m ⁻³)	Umidade Crítica (m ³ m ⁻³)	Tensão Crítica (kPa)
Arenosa	0,1700	0,0847	0,1374	10
Areia Franca	0,1997	0,0549	0,1563	14
Franco-Arenosa	0,2094	0,0807	0,1708	16
Franco	0,3156	0,1033	0,2519	26
Franco-Argilo-arenosa	0,2355	0,0894	0,1917	19
Argilo-Arenosa	0,1639	0,1508	0,1599	14
Franco-Argilo-siltosa	0,2397	0,0743	0,1901	23
Argila	0,3560	0,2555	0,3111	49

¹ CC: Capacidade de campo. ² PMP: Ponto de Murcha Permanente.

Tabela 8. Valores do intervalo em dias entre irrigações por aspersão para a bananeira para diferentes evapotranspirações médias da cultura em diferentes tipos de solo.

Textura do solo	Evapotranspiração potencial da cultura (ET _c , mm dia ⁻¹)				
	2	3	4	5	6
Arenoso	7	4	3	3	2
Franco-arenosa	8	5	4	3	3
Franco	13	8	6	5	4
Argila	10	7	5	4	3

Em sistemas de irrigação localizada, a recomendação para regiões semiáridas é irrigação diária e com pulsos, ou intervalos menores que 24 horas para solos do tipo arenoso ou areia franca. Em solos de textura argilosa, a irrigação diária em condições semiáridas é mais adequada no gotejamento, para emissores de baixa vazão (entre 1,5 e 2,5 L h⁻¹), podendo-se estender o intervalo entre irrigações para dois dias independente da vazão dos emissores. Em regiões úmidas e subúmidas, os intervalos entre irrigações para solos de textura média podem ser de até dois dias, e até três dias em solos de textura argilosa, exceto no verão, em condições máximas da evapotranspiração de referência (acima de 4 mm dia⁻¹).

Na instalação dos sensores de água do solo para a bananeira, deve-se levar em consideração a região da zona radicular onde se encontra 80% do comprimento total do sistema em interseção com a zona efetiva de extração de água pelas raízes. A região da zona radicular da bananeira de modo geral encontra-se até 0,83 m de distância efetiva da touceira ou "família" e a profundidades variando de 0,33 a 0,60 m (COELHO *et al.*, 2008; CARR *et al.*, 2009; SANT'ANA *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016). A extração de água pelas raízes se deve, entre outras razões, aos gradientes de potenciais totais de água ou de umidade entre o solo e as raízes. A localização desses gradientes apresenta variação temporal e espacial no perfil do solo, contudo, para fins de manejo da água de irrigação em campo, os limites onde 80% da extração total no perfil ocorre, encontra-se na profundidade de até 0,40 m, sob o sistema de gotejamento; e de 0,50 m até 0,60 m, sob sistema de microaspersão. A distância efetiva onde ocorre 80% da extração de água na zona radicular está em 0,70 m (COELHO *et al.*, 2008; SANTANA JÚNIOR *et al.*, 2020). Assim, o posicionamento de sensores de umidade ou potencial

mais adequado é na distância máxima da planta de 0,50 m para gotejamento e 0,60 m para microaspersão, e profundidades entre 0,20 m e 0,35 m nos dois sistemas de irrigação (COELHO *et al.*, 2016).

O uso do método de manejo de água com base na redução da água disponível do solo é de fácil uso, uma vez que for definido a umidade ou o potencial de água. A lâmina de água a ser repostada ao solo será a diferença do limite superior da disponibilidade da água do solo e a umidade crítica. O tempo de irrigação (h) para sistemas de aspersão convencional será dado pela razão da lâmina a ser repostada (mm) e a intensidade média de precipitação do aspersor (mm h^{-1}). A lâmina de água para o sistema de irrigação localizada (mm) será calculada da mesma forma, apenas considerando a percentagem de área molhada (fração); o volume a ser aplicado deve considerar o produto da lâmina calculada (mm) com a área de ocupação da touceira de bananeira (m^2). O tempo de irrigação (h) será a razão do volume de água em litros e a vazão por planta dos emissores (L h^{-1}). O produtor obtendo os cálculos da lâmina de reposição para um valor fixo da umidade crítica conforme a curva de retenção de água do solo ou a Tabela 4, mas mantendo sempre esse critério, um cálculo apenas é necessário.

O manejo da água de irrigação feito apenas a partir da evapotranspiração do genótipo de bananeira é mais adequado para sistemas de maior eficiência de irrigação como a microaspersão e o gotejamento. O método assume que o que entra de irrigação considerando a precipitação efetiva, deve corresponder a lâmina ou volume de água de reposição da água evapotranspirada no período desde a última irrigação. As perdas por percolação e escoamento superficial são negligenciadas. O momento da irrigação pode ser definido pelo turno de rega fixo ou pelas leituras dos sensores de água do solo com base em uma umidade crítica.

O manejo pelo balanço de água do solo ou na zona radicular envolve o acompanhamento da umidade ou do potencial da água do solo e da evapotranspiração do genótipo desde o início da estação de irrigação, quando a umidade do solo deve estar no limite superior da disponibilidade de água ou na capacidade de campo. O momento da irrigação é levado em conta e a irrigação será função da evapotranspiração acumulada levando em consideração a precipitação efetiva no período.

O uso da técnica de regulação do *deficit* de irrigação (RDI) permite uma economia de água durante o ciclo da bananeira de até 25% da lâmina de irrigação. Na fase de crescimento vegetativo da cultura, pode-se reduzir até 21% da lâmina de irrigação. Na fase final de crescimento dos frutos de banana, quando os mesmos atingem o tamanho máximo para colheita, pode-se reduzir até 25% da lâmina de irrigação com garantia da produtividade potencial da cultura (COELHO *et al.*, 2019).

O manejo de água pela irrigação lateralmente alternada (secamento parcial das raízes) pode ser aplicado à cultura da bananeira tanto para os cultivares com maior eficiência de uso de água como a BRS Princesa e a Grande Naine, como também, para os cultivares tipo Prata. A redução de produtividade é um fator limitante nesse método, mas não excede 7%, 12% e 16% para os cultivares Grande Naine, BRS Princesa e Prata-Anã clone Gorutuba, respectivamente, no primeiro ciclo. As reduções de produtividade dos cultivares são menores nos ciclos subsequentes (COELHO *et al.*, 2019).

O manejo da água de irrigação, além de consistir na definição do momento de irrigar e da quantificação da irrigação, envolve também o horário da irrigação. O menor custo da energia dentro do horário de 21 horas e 30 minutos até as 6 horas leva os produtores a preferirem esse horário para irrigação. A bananeira mantém suas atividades de transpiração e fotossíntese do início até o final do dia. Os estômatos

permanecem fechados durante a noite, com interrupção da transpiração e da fotossíntese. Solos de textura arenosa com alta velocidade de infiltração, irrigados nas primeiras horas, ou seja, após as 21 horas e 30 minutos, perdem a maior parte da água aplicada por percolação durante a noite. Isso só não ocorrerá caso haja um gradiente textural na zona radicular ou abaixo dela, de forma que a camada inferior tenha uma condutividade hidráulica muito mais baixa que a da camada superior. Deve-se escolher horários de baixa intensidade de ventos, menor temperatura e alta umidade relativa do ar, o que ocorre nas primeiras horas da manhã, no final da tarde ou à noite. A cultura da bananeira apresenta uma taxa de elevação da transpiração constante a partir das primeiras horas de luz solar até próximo de 11 horas, mantendo seu valor máximo até o período entre 14 e 15 horas. A partir daí tende a reduzir a uma taxa quase constante até o início da noite (LU *et al.*, 2002).

21.4 Irrigação do mamoeiro (*Carica papaya*)

21.4.1 Principais regiões produtoras

As mudanças climáticas favorecem uma redução da disponibilidade hídrica (EDENHOFER *et al.*, 2014) das áreas produtoras de mamão do estado da Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte e Espírito Santo, onde estão localizados os maiores polos de produção dessa fruta no Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019). Levando em consideração os cenários futuros de mudanças climáticas, os maiores riscos para cultura do mamoeiro, nas principais regiões produtoras da Bahia, por exemplo, estariam relacionados aos aumentos térmicos, que poderiam atingir os limites máximos críticos para cultura e, principalmente, à elevação das demandas hídricas, tornando imprescindível o uso contínuo da irrigação para muitas localidades que atualmente a utilizam apenas de forma complementar (COELHO FILHO *et al.*, 2009).

O mamoeiro é considerado uma das plantas frutíferas com maior precocidade de produção (JIMÉNEZ *et al.*, 2014). A partir do terceiro ou quarto mês após o plantio, as fases de crescimento, floração e maturação dos frutos ocorrem simultaneamente. Assim, com base nesse intenso desenvolvimento, em regiões com precipitações anuais inferiores a 1.200 mm, ou até mesmo com volumes acumulados superiores a 1.500 mm, porém com distribuição irregular ao longo do ano, torna-se imprescindível o suprimento adequado e constante de água por meio da irrigação, para manutenção do potencial produtivo da cultura.

Tanto a produção como o crescimento do mamoeiro respondem positivamente ao incremento de lâminas de água aplicadas (MELO *et al.*, 2020, COELHO; SIMÕES, 2010; POSSE *et al.*, 2009; ALMEIDA *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2001), embora a eficiência do uso da água possa ser reduzida em função das perdas de água no solo por percolação, principalmente em solos arenosos (MELO *et al.*, 2020).

21.4.2 Sistemas de irrigação

Nos pomares de mamoeiro, o método de irrigação localizada e aspersão têm sido os mais utilizados. Dentre esses métodos, os sistemas de irrigação por microaspersão e gotejamento são os mais recomendados e adotados. No sistema por microaspersão, normalmente utiliza-se um emissor para duas ou quatro plantas de mamoeiro, desde que a uniformidade de distribuição de água pelos emissores seja superior a 85%.

Em pomares de mamoeiro, o sistema por gotejamento pode ser usado tanto enterrado quanto superficial. No sistema por gotejamento enterrado, a linha de

gotejadores deve ser enterrada de 0,20 a 0,30 m de profundidade, de forma que promova um bom desenvolvimento do sistema radicular. Além disso, recomenda-se o uso de gotejadores de fluxo turbulento com vazão igual ou menor que 2 L h^{-1} , e que o plantio do mamoeiro seja realizado no período chuvoso, com intuito de estabelecer para o período de *deficit* hídrico um sistema radicular capaz de utilizar a água disponível do volume molhado criado pelo emissor.

A configuração do gotejamento superficial pode ser com duas linhas laterais ou apenas uma linha lateral por fileira de plantas. Em pomares de mamoeiro localizados em regiões semiáridas, com solo de textura média argilosa, recomenda-se o sistema de gotejamento superficial com duas linhas laterais por fileira de plantas, com três gotejadores por linha lateral, sendo um gotejador central próximo da planta e os outros dois a 0,40 m desse. Já em pomares localizados em regiões úmidas ou subúmidas, normalmente, recomenda-se uma linha lateral por fileira de plantas com essas mesmas disposições dos emissores.

Dentre os sistemas de irrigação por aspersão, os sistemas do tipo pivô central e autopropelido são os mais utilizados em áreas produtoras de mamão. Nesses sistemas, os jatos de água são direcionados sobre o mamoeiro, o que contribui para o aumento da queda das flores devido ao impacto do jato. A irrigação por aspersão, em períodos e em horários do dia de maior temperatura, reduz a temperatura foliar e o *deficit* de pressão de vapor folha-ar (DPVfolha-ar) por manter os estômatos abertos, favorecendo assim a manutenção da taxa fotossintética líquida, o que reflete na produtividade do mamoeiro (REIS; CAMPOSTRINI, 2011). Apesar dos benefícios da irrigação por aspersão nas relações fisiológicas, a aplicação de água sobre as folhas do mamoeiro pode propiciar o surgimento de pragas e doenças, devido à formação de condições microclimáticas (temperatura e umidade relativa do ar) favoráveis (REIS *et al.*, 2013).

21.4.3 Necessidades hídricas do mamoeiro

O mamoeiro é exigente em água, no entanto não tolera excesso de umidade no solo. A necessidade hídrica do mamoeiro varia de acordo com as condições climáticas locais, com a fase do desenvolvimento vegetativo/reprodutivo da planta e com a variedade cultivada.

Em cultivos de mamoeiro (espaçamento 3,0 x 1,7 m) submetidos a uma baixa demanda evapotranspiratória, com plantas na fase inicial de crescimento e floração até os sete meses do plantio ou plantas no início da fase de floração/produção, o consumo de água pode variar de 2 a 4 mm d⁻¹. Essa recomendação também é válida para áreas litorâneas (MONTENEGRO *et al.*, 2004). Já nos cultivos submetidos à elevada demanda da evapotranspiração, ou seja, alta temperatura e baixa umidade do ar (região semiárida da Bahia e do Norte de Minas Gerais), com plantas na fase produtiva (acima dos sete meses após o transplante), o consumo de água da cultura (espaçamento 3,0 x 1,7m) pode variar de 5,0 a 6,5 mm dia⁻¹. Em pomares com plantas adultas entre o 9º e o 12º mês após o transplante e na fase de produção, a demanda máxima diária de água é de 30 a 35 L planta⁻¹ (COELHO *et al.*, 2011).

Por ser uma planta herbácea e com elevada condutividade hidráulica, o fluxo de seiva e a transpiração do mamoeiro acompanham a dinâmica das variações da radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ao longo do dia (COELHO FILHO *et al.*, 2006). Em dias sem nuvens e com elevada disponibilidade energética, a transpiração do mamoeiro alcança valores elevados (Figura 5a). Já em dias chuvosos ou nublados e com baixa disponibilidade energética, a transpiração do mamoeiro reduz drasticamente a valores próximos de zero em razão da ocorrência de chuva próxima às 12 horas (Figura 5b).

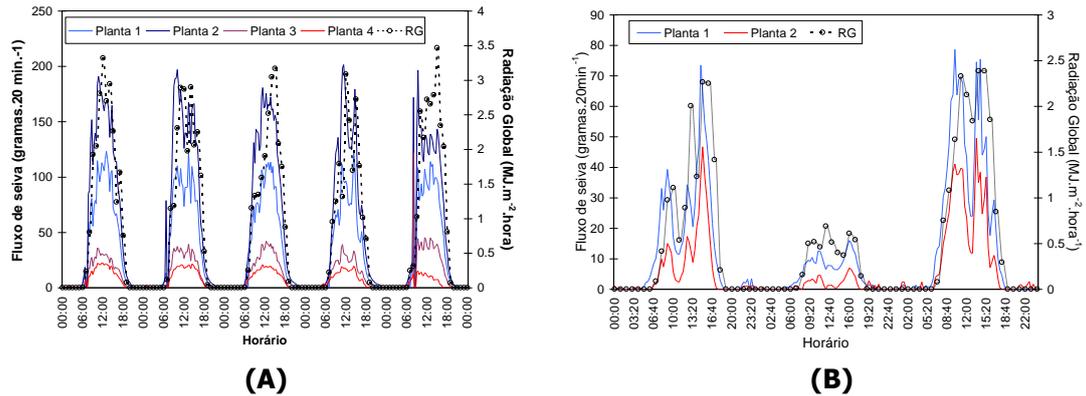


Figura 5. Transpiração máxima de plantas de mamoeiro 'Tainung número 1' em dias sem nuvens e com elevada disponibilidade energética (A) em dias chuvosos e com baixa disponibilidade energética (B) (COELHO FILHO *et al.*, 2006).

O *deficit* hídrico no solo contribui mais para a redução da taxa fotossintética nos dias sem nuvens do que em dias nublados, principalmente devido ao comportamento dos estômatos (REIS; CAMPOSTRINI, 2008). Geralmente, a condutância estomática do mamoeiro sofre reduções significativas quando a tensão de água no solo atinge valores entre -50 a -60 kPa. No caso do mamoeiro com 6 meses de idade, Marler e Mickelbart (1998) verificaram uma redução da taxa fotossintética em 50%, quando a tensão de água no solo passou de -20 para -68 kPa.

21.4.4 Manejo de água de irrigação

O manejo da irrigação do mamoeiro pode ser realizado via solo ou via clima, ou por meio de informações de ambos simultaneamente. No manejo via solo, a umidade/tensão de água no solo é mensurada por meio de sensores (Tensiômetros, Watermarks, Sondas TDR, entre outros) para definir o momento de irrigar ou a quantidade de água a repor ao solo e à planta. A umidade ou tensão de água do solo até a qual a planta é capaz de extrair água de forma a suprir os gradientes de potenciais na rota raiz-planta-atmosfera, ou a umidade/potencial crítico varia com o tipo de solo. Assumindo que essa umidade/potencial de água ocorre quando a água disponível reduz em 30% a partir do seu limite superior (capacidade de campo), pode-se estabelecer os mesmos limites máximos de redução da disponibilidade de água para diferentes texturas do solo usados para a bananeira (Tabela do tópico da bananeira).

Os intervalos entre irrigações para o uso do sistema de aspersão podem ser os mesmos usados para a bananeira. O produtor, entretanto, pode estabelecer a umidade e potencial crítico de forma mais precisa com dados físicos e a curva de retenção de umidade do solo após amostragem e análise em laboratório. O intervalo entre irrigações para o sistema de gotejamento e microaspersão segue os mesmos sugeridos para a bananeira.

Os sensores desempenham um papel fundamental no manejo da água de irrigação, mas desde que localizados de forma que possam atender a necessidade da planta. A região da zona radicular mais adequada para o sistema de gotejamento em fileira simples com três emissores por planta espaçados de 0,40 m entre si é na direção da fileira de plantas a no máximo 0,65 m da planta e a profundidades entre 0,20 e 0,45 m. No sistema de gotejamento com duas linhas laterais e gotejadores de 4 L h⁻¹, a profundidade de instalação é até 0,35 m, uma vez que o mesmo volume é dividido nas duas linhas laterais com menor tempo de irrigação e portanto, menor profundidade do

volume molhado. A instalação dos sensores na microaspersão com uma linha lateral entre duas fileiras de plantas é mais adequada considerando a direção planta-microaspersor na distância de 0,55 m da planta na profundidade entre 0,20 m e 0,40 m. (SANTOS, 2020; COELHO; SIMÕES, 2015; COELHO *et al.*, 2005). Essas recomendações consideram de forma segura a região de instalação dos sensores, mesmo considerando a variabilidade das zonas de extração de água, no entanto a zona de maior atividade no sistema radicular é observada até 0,40 m da planta e a profundidades próximas de 0,30 m.

21.4.5 Manejo via clima e balanço de água na zona radicular

No manejo de água de irrigação no mamoeiro, o cálculo da evapotranspiração requer o coeficiente da cultura. Nas condições litorâneas do Norte do Estado do Rio de Janeiro e do Estado do Espírito Santo (clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão) esses coeficientes para o mamoeiro Híbrido UENF/CALIMAN01 variam linearmente de 0,63 no transplântio até 1,05 a 206 dias após o transplântio (DAT). Além disso, após esse período, a variação do Kc relaciona-se inversamente com o diâmetro de copa do mamoeiro, reduzindo-se ao valor médio mínimo de 0,81, aos 300 DAT (POSSE *et al.*, 2008). Nas condições dos Tabuleiros costeiros do recôncavo da Bahia (clima tropical quente e úmido), para o cultivar Sunrise Solo, os coeficientes que resultam em maiores produtividades e eficiência no uso da água são de 0,31, 0,42, 0,52 e 0,84 para 0-30 dias após o plantio (DAP), 31-60 DAP, 61-120 DAP e acima de 120 DAP, respectivamente (COELHO *et al.*, 2010). Esses coeficientes para cultivar Tainung número 1 são de 0,38; 0,51; 0,64 e 1,02 para 0-30 DAP, 31-60 DAP, 61-120 DAP e acima de 120 DAP, respectivamente (COELHO; SIMÕES, 2010).

Levando em consideração as áreas foliares do mamoeiro 'Tainung 1' e 'Sunrise Solo', Coelho Filho *et al.* (2006) obtiveram, as curvas de coeficiente de cultura conforme apresentado na Figura 2. O coeficiente de cultivo máximo (1,20) ocorre a 270 dias após o plantio para o cultivar Sunrise Solo e a 225 dias após o plantio para o cultivar Tainung número 1, quando para essas dois cultivares a área foliar média atinge o valor máximo (Figura 6).

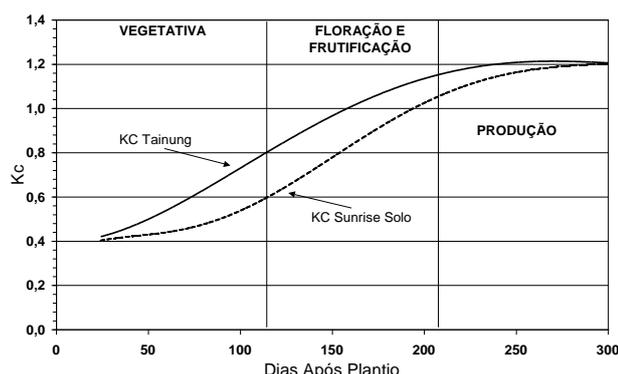


Figura 6. Coeficientes de cultura (Kc) para os cultivares Tainung nº 1 e Sunrise Solo ao longo do tempo, obtidos como função da área foliar (COELHO FILHO *et al.*, 2006).

Os coeficientes de cultura para o mamoeiro Sunrise nas condições do norte do Estado do Ceará variam de 0,64; 1,16 e 1,19 para os estádios fenológicos de crescimento vegetativo, floração frutificação e floração frutificação e maturação, respectivamente (MONTENEGRO *et al.*, 2004). De modo geral, o valor máximo do coeficiente de cultivo do mamoeiro deve ser mantido até pelo menos 370 dias após o plantio, quando pode ocorrer reduções da área foliar total das plantas e da própria

produção do mamoeiro de até 35% para cultivar Tainung 1 e de até 50% para o cultivar Sunrise Solo. Nessas situações, será necessário fazer ajustes do coeficiente cultivo para a nova condição, como sugerido por Posse *et al.* (2008).

Em pomares de mamoeiro irrigado por gotejamento ou microaspersão, o KI pode ser considerado de 0,65 até o terceiro mês do plantio; 0,75 no quarto; 0,85 do quinto ao sexto mês e 1,00 a partir do sétimo ou adotar a metodologia proposta por Ferreres (1987).

Vale ressaltar que independente do manejo via solo ou via clima, para que não ocorra redução de produtividade do mamoeiro devido à disponibilidade hídrica do solo, recomenda-se que a água disponível no solo permaneça ao longo do ciclo produtivo superior ou igual a 70%, ou seja, um fator de disponibilidade (f) de redução da disponibilidade de 0,30 (SANTOS, 2020).

21.4.6 Uso de técnicas de manejo de irrigação com *deficit* hídrico

Dentre as técnicas de manejo de irrigação com *deficit* hídrico, a técnica PRD "Partial Root-zone Drying" ou secamento parcial da zona radicular vem sendo apontada como uma estratégia viável e promissora para o aumento da eficiência do uso de água em áreas irrigadas de mamoeiro. O mamoeiro 'Tainung 1' cultivado em condições semiáridas sob PRD com frequência de alternância do lado irrigado de 7 dias e redução de 35% lâmina de irrigação pode aumentar a eficiência do uso de água em 23,2% e gerar uma economia de água de 43,3 litros para cada quilograma de fruto produzido, quando comparada com as plantas submetidas a irrigação plena, ou seja, sem redução da lâmina de irrigação (SANTOS *et al.*, 2021). A técnica PRD não compromete as qualidades químicas dos frutos, isto é, o pH, a acidez titulável (AT), o teor de sólidos solúveis (SS) e a relação SS/AT dos frutos do mamoeiro.

O mamoeiro 'Golden' cultivado sob PRD, com frequência de alternância do lado irrigado de 14 dias associada a uma redução de 30% da lâmina de irrigação, na primeira colheita, o uso da técnica PRD permitiu um ganho de 6,5 kg de frutos por planta e uma redução na pegada hídrica (L de água utilizado por cada kg de fruto colhido) de 47,6% (LIMA *et al.*, 2015). A pegada hídrica com uso da técnica foi de 119 L de água por 1 kg de fruto produzido, enquanto sem a irrigação com *deficit* com uso do PRD, a pegada hídrica foi de 227 L de água por quilo de fruto.

21.4.7 Uso de imagens termais

Apesar dos poucos trabalhos científicos realizados em áreas irrigadas de mamoeiro, as ferramentas do sensoriamento remoto vêm sendo apontada como promissoras na identificação do vigor vegetativo da cultura e os períodos de maior estresse térmico associado ao aumento do *deficit* de pressão de vapor do ar. Por exemplo, por meio do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada foi possível identificar dois cenários em relação ao vigor vegetativo do mamoeiro irrigado (Figura 7) nas condições do projeto Formoso, em Bom Jesus da Lapa - BA (SANTOS *et al.*, 2021). Um cenário de elevada temperatura e *deficit* de pressão de vapor do ar (3,4 kPa), com maior estresse térmico (imagem: 27/01/2017), conseqüentemente, maior taxa de abscisão das folhas basais correspondeu a menores valores do NDVI. Em contraste, outro cenário nas imagens de 20/02/2017, 06/03/2017 e 28/04/2017, de um período com *deficit* de pressão de vapor do ar mais ameno (2,5 kPa), que favoreceu a uma menor taxa de abscisão das folhas basais correspondeu a maiores valores de NDVI (Figura 7).

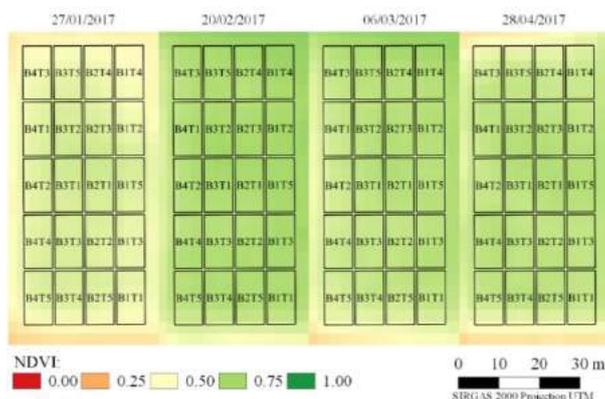


Figura 7. Imagens de NDVI provenientes da constelação PlanetScope durante o período de condução do experimento com mamoeiro irrigado em Bom Jesus da Lapa, Bahia, Brasil.

21.5 Irrigação da mangaueira (*Mangifera indica* L.)

21.5.1 Regiões de cultivo

A manga (*Mangifera indica* L.) se destaca como uma das frutas mais populares e comercializadas no mundo, sendo o Brasil o sétimo maior produtor mundial (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2010) e um dos principais exportadores. Segundo Mouco (2015), o cultivo da mangaueira no Brasil iniciou-se com os plantios de forma extensiva, utilizando-se variedades locais e empregando poucas tecnologias. Posteriormente, com a elevação do nível tecnológico, incluindo o uso da irrigação, da capacidade de indução floral e do aparecimento de variedades melhoradas, houve uma expansão da área cultivada com manga, iniciando-se no Estado de São Paulo, com posterior difusão para o restante do País, principalmente nos polos de agricultura irrigada do Nordeste, como no Submédio do Vale do São Francisco (Bahia e Pernambuco), nos Vales do Jaguaribe, Açu-Mossoró, Parnaíba e Platô de Neópolis, nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí e Sergipe, respectivamente.

Em 2017, a manga foi a fruta mais exportada pelo país, sendo a Região Nordeste responsável por 71,78% do total nacional, sendo 80% do volume do Nordeste proveniente do Vale do Submédio São Francisco (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017; KIST *et al.*, 2018). Entretanto, embora as condições climáticas dessa região proporcionem excelentes possibilidades de cultivo, como melhoria na coloração dos frutos e redução dos seus níveis de doenças (MOUCO, 2015), a precipitação pluviométrica do semiárido brasileiro é escassa e mal distribuída, não atendendo à demanda hídrica das culturas, o que torna indispensável o uso da irrigação.

O cultivo de manga na Região Nordeste é diferenciado do das demais regiões do país, pelas suas características climatológicas como, intensa radiação solar, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar, que contribuem para elevar a evapotranspiração na maioria dos polos de fruticultura da região.

21.5.2 Sistemas de irrigação

Os sistemas de irrigação, de sulco e aspersão, em virtude das suas baixas eficiências, quando comparados com a irrigação localizada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008), não são recomendados para a mangaueira. O uso do sistema de aspersão para o cultivo da mangaueira destaca, ainda, como agravante o umedecimento das entrelinhas, que favorece o desenvolvimento de plantas daninhas, aumenta as

perdas de água por evaporação e a interceptação do jato d'água pela copa das plantas, no período de floração, podendo causar redução do número de panículas e afugentar os insetos polinizadores (PINTO *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 1996).

Atualmente, os sistemas de microaspersão e gotejamento são os mais utilizados pelos produtores para o cultivo irrigado da mangueira, uma vez que os mesmos geram uma eficiência de aplicação entre 70 e 95% e apresentam uma menor demanda de energia. A microaspersão deve ter preferência para solos de textura arenosa e sem gradientes texturais em relação ao gotejamento, entretanto pode ser usada em todos os tipos de solo, ao passo que o gotejamento é mais adequado em solos de textura média a argilosa.

A disposição dos emissores nas áreas de cultivo também pode interferir na eficiência de aplicação e na redistribuição da água no solo, mesmo quando se mantém o mesmo tempo de irrigação e volume de água aplicado (SIMÕES *et al.*, 2017). O gotejamento deve ser usado com duas linhas laterais por fileira de plantas (SIMÕES *et al.*, 2020; PINTO *et al.*, 2011). Simões *et al.* (2020a), verificou maior produtividade da mangueira cultivares Palmer e Keitt sob gotejamento com duas linhas laterais em relação a produtividade desses cultivares com uma linha lateral de gotejamento em faixa contínua em formato de anel ao redor da planta. O gotejamento com duas linhas laterais por fileira de plantas interfere positivamente na atividade fotossintética, na condutância estomática, na produtividade e no número e na firmeza dos frutos (SIMÕES *et al.*, 2020a).

No uso da microaspersão em mangueiras, é comum a instalação de um microaspersor a 0,30 m da planta. Nesse caso, o volume molhado, ou parte desse, fica sob a copa da planta, cujo sombreamento reduz a evaporação de água do solo. A vazão do microaspersor instalado dessa forma não precisa ser acima da faixa de 45-55 L h⁻¹, uma vez que vazões maiores acarretam raios de alcance da água acima de 2,50 m, onde o sistema radicular tem menor relevância quanto ao comprimento e densidade de raízes (COELHO *et al.*, 2001; KOTUR *et al.*, 1997), inclusive, de absorção de água e nutrientes para a planta. Outra forma de uso da microaspersão na mangueira é instalando os microaspersores entre plantas ao longo da fileira. Simões *et al.* (2020b) observaram maior produtividade da mangueira (cultivar Kent) com os microaspersores nessa condição, comparada à instalação dos mesmos junto das plantas. Nesse caso, a vazão dos emissores deve ser suficiente para formar uma faixa molhada contínua, o que requer uma sobreposição dos raios de alcance dos seus jatos. O espaçamento entre plantas, nesse caso, não deve exceder a 5,0 m.

21.5.3 Necessidades hídricas da mangueira

Apesar da mangueira ser considerada uma planta tolerante à seca, mesmo com o uso de um sistema de irrigação adequado, estudos têm demonstrado que a baixa disponibilidade hídrica no solo, decorrente do manejo incorreto da irrigação, pode afetar eventos fisiológicos, como o crescimento da parte aérea e do sistema radicular, a produtividade e a qualidade dos frutos (PRAKASH *et al.*, 2015). A deficiência hídrica no solo retarda o crescimento das gemas vegetativas e colabora para o crescimento das gemas florais.

A fase de crescimento de frutos é a fase de maior demanda hídrica do ciclo produtivo, onde a ocorrência de deficiências hídricas pode afetar seriamente a produção. A fase da planta mais crítica à falta de água compreende o intervalo entre a 4ª e a 6ª semana após o estabelecimento dos frutos, quando um período de 30 dias sem irrigação

é suficiente para reduzir o tamanho dos frutos em 20% em comparação com a cultura sob irrigação (SCHAFFER *et al.*, 1994).

Na região semiárida do Nordeste Brasileiro a mangueira requer aproximadamente 1370 mm de água por ano (SILVA *et al.*, 1996), ou seja, 13.700 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. A evapotranspiração obtida com o balanço de energia (razão de Bowen) de mangueiras de 6 anos de idade na região do submédio São Francisco no período de julho a dezembro de 1998 subestimou a evapotranspiração da cultura (3,4 mm dia⁻¹ a 6,1 mm.dia⁻¹) comparada a obtida com o balanço hídrico (3,6 mm dia⁻¹ a 10,1 mm dia⁻¹) (LOPES, 1999). A demanda hídrica da mangueira pela evapotranspiração nas fases de floração, queda de frutos, crescimento de frutos e maturação nas condições do polo Juazeiro-Petrolina são na ordem de 3,5; 3,8; 4,5 e 4,9 mm dia⁻¹, respectivamente (SILVA, 2000).

A evapotranspiração potencial da cultura de manga (ETc) é o indicador quantitativo da necessidade hídrica da cultura. São poucos os valores de Kc disponíveis aos produtores, o que pode reduzir a eficiência do cultivo, quando são utilizados os dados já existentes para as novas variedades implantadas na região.

Na região de Petrolina (PE), os valores de Kc da mangueira (cv. Tommy Atkins), aos 18 anos de idade irrigadas por microaspersão, com um emissor por planta, com molhamento de 70% da superfície do solo, em dois ciclos de cultivo (2003-2004 e 2004-2005) foram: (i) na fase fenológica de repouso 0,7; na de crescimento vegetativo 0,8; na de maturação dos ramos, indução floral e início da floração 1,0; na correspondente ao fim da floração até o crescimento do fruto 0,9; na de maturação 0,8 e na de colheita 0,6 (TEXEIRA *et al.*, 2008). Outra recomendação de Kc para a mangueira em condições semiáridas é: 0,40 para o primeiro ano do plantio; 0,45 para o segundo ano; 0,50 para o terceiro ano. A partir do quarto ano. Os valores de Kc são: 0,65 na fase vegetativa; 0,80 nos 40 dias a partir do início da floração (DIF); 0,95 no período de 41 a 120 DIF; 1,00 entre 121 e 145 DIF e 0,80 até a colheita (SILVA, 2000). Simões *et al.* (2021) com base variações da ETc determinada usando Kc recomendados por Texeira *et al.* (2008) obtiveram valores de Kc de (i) na fase fenológica de repouso 0,57; na de crescimento vegetativo 0,66; na de maturação dos ramos, indução floral e início da floração 0,82; na correspondente ao fim da floração até o crescimento do fruto 0,66; na de maturação 0,8 e na de colheita 0,49 com produtividades de 36,4 t ha⁻¹ e 31 t ha⁻¹ em dois ciclos.

21.5.4 Manejo da irrigação

O manejo da água sob irrigação localizada com reposição da lâmina para elevar a umidade a 100% da disponibilidade de água do solo na zona radicular efetiva da mangueira, quando feito a partir do estado da água do solo, pode considerar o turno de rega fixo ou variável, conforme a umidade ou potencial de água crítico definido pela curva de retenção de água associado à depleção ou à redução da disponibilidade de água de 50% (SOARES; COSTA, 1995), ou de 33% entre o início da floração e a colheita, e de 66% no restante do ciclo (AZZOUZ *et al.*, 1977). Em condições semiáridas, se o intervalo entre irrigações for fixo, deve ser diário em solos de textura média e em solos argilosos com gotejadores de baixa vazão em faixa contínua; deve ser diária e ou com pulsos em solos arenosos. Nos solos argilosos, com gotejadores de vazões de 4 Lh⁻¹ ou acima, espaçados até 1,0 m em irrigação tipo ponto fonte o intervalo entre irrigação pode ser maior que um dia. O cálculo da lâmina de irrigação para determinar a lâmina de reposição da água no solo desde a última irrigação pela lâmina, referente à depleção ou à redução de 33 a 66% da água disponível do solo, requer a profundidade efetiva da zona radicular que, para plantas adultas pode ser considerada 0,60 m. Entretanto os cálculos podem resultar em volumes elevados de água, mesmo com menores

percentagem de área molhada, o que ocorre para espaçamentos mais largos. Dessa forma, a aplicação mais coerente é para cultivos adensados.

O uso da evapotranspiração para quantificar a lâmina de água para repor ao solo pode ser usada por si só ou associada à redução da água disponível do solo de 33 a 66% (SOARES; COSTA, 1995; AZZOUZ *et al.*, 1977) pelo balanço de água na zona radicular. O cálculo da evapotranspiração considera além da evapotranspiração máxima ou de referência e o coeficiente de cultura a percentagem da área molhada ou o coeficiente de localização, K_r (Tabela 9).

Tabela 9. Percentagem de sombreamento (P_s) e coeficiente de correção (K_r) da ETC para a mangueira em função de diferentes diâmetros de copa e espaçamentos de plantas (COELHO *et al.*, 2005).

Espaçamento das plantas (m x m)	Diâmetro de copa (m)	Sombreamento (%)	K_r (FERERES, 1981)
4 x 7,5	2	10	0,49
4 x 7,5	3	24	0,56
4 x 7,5	4	42	0,76
4 x 7,5	5	65	1,00
4 x 7,5	6	94	1,00
5 x 8	2	8	0,46
5 x 8	3	18	0,65
5 x 8	4	31	0,64
5 x 8	5	49	0,83
5 x 8	6	71	1,00

O objetivo do balanço é acompanhar diariamente a variação do conteúdo de umidade do solo, partindo do solo na capacidade de campo e contabilizando a evapotranspiração e a percolação. A avaliação é diária sendo que todos os componentes da equação do balanço devem também ser diários, ou seja, o mangicultor deve ter à mão os valores diários de ETC, percolação, I , e precipitação efetiva. O produtor pode optar por um balanço mais simples onde despreza na equação do balanço a percolação e a variação de umidade ou a redução da água disponível e vai considerar a ETC subtraída da precipitação efetiva como a lâmina de irrigação.

A mensuração da redução da água disponível do solo é feita pelos sensores de umidade (reflectometria no domínio do tempo - TDR e da frequência - FDR), ou com instrumentos que medem por meio indireto, com a leitura do potencial da água no solo (tensiômetros e blocos de resistência). A instalação desses sensores em relação à planta da mangueira adulta para a irrigação localizada (microaspersão e gotejamento), de forma a representar a condição hídrica do solo no limite superior de sua disponibilidade (capacidade de campo) e na umidade ou potencial crítico para a planta, deve ser feita entre 0,20 e 1,0 m do tronco e a profundidades entre 0,20 e 0,6 m (COELHO *et al.*, 2007).

Uma das formas utilizada pelo produtor para melhorar a eficiência do cultivo irrigado da mangueira, é ofertar suas safras em períodos de maior viabilidade econômica. Neste sentido, para induzir a floração da mangueira, além da aplicação de

reguladores vegetais e manejos de poda e adubação, utiliza-se irrigação com *deficit* hídrico, que mantém a árvore em repouso e evita a emissão de fluxos vegetativos, diminuindo os níveis de giberelinas levando, conseqüentemente, à maturação dos ramos (RAMÍREZ; DAVENPORT, 2010). Além de economizar água, o *deficit* hídrico pode manter ou até mesmo aumentar o rendimento das culturas, assim como, melhorar a qualidade dos frutos (LIU *et al.*, 2016).

O *deficit* hídrico deve iniciar em aproximadamente 60 dias após aplicação do indutor de floração PBZ (Paclobutrazol), podendo o efeito desejado ocorrer entre 30 e 70 dias a depender da característica climática da região. A irrigação deve ser reiniciada gradualmente até atingir seu ponto máximo, quando sintomas de brotação floral forem observados em 60% das plantas (MOUCO, 2004). A água não deve ser totalmente suspensa na fase de indução floral, uma vez que a planta deve continuar fotossintetizando e acumulando reservas, sendo que sua suspensão total torna propícia a ocorrência de surtos vegetativos no caso de chuva (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002; MOUCO, 2004).

21.5.5 Irrigação com *deficit*

O *deficit* hídrico aplicado em fases fenológicas isoladas da mangueira, além de economizar água, pode manter ou até mesmo aumentar o rendimento das culturas, assim como melhorar a qualidade dos frutos (LIU *et al.*, 2016). A fase da floração ao pagamento de frutos é a mais sensível a estresses hídricos do solo pela mangueira, cultivar Palmer (COELHO *et al.*, 2012), pelo cultivar Tommy Atkins (SANTOS *et al.*, 2013; COELHO FILHO; COELHO, 2005). A redução da lâmina de irrigação em até 25% durante a fase de crescimento dos frutos aumenta a eficiência de uso da água e não afeta a produtividade da mangueira, cultivar Palmer ou Tommy Atkins (COELHO *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016), entretanto, pode ocorrer perda de produção de até 16% (COELHO FILHO; COELHO, 2005).

O método do secamento parcial da zona radicular, que pode ser usado em fases ou em todo o ciclo da cultura com reduções da aplicação de água em até 50%, se adapta bem à cultura da mangueira. O uso de uma frequência de alternância dos lados irrigados da fileira de plantas de 7 ou 14 dias para a Mangueira cultivada Palmer com aplicação de 50% do volume da água de irrigação calculada resulta em produtividades semelhantes às com a irrigação com volume total calculado nas condições semiáridas do Norte de Minas, com o manejo feito a partir do pagamento de frutos (TEXEIRA *et al.*, 2008). A frequência de alternância de 7 ou 14 dias com aplicação de 50% da lâmina calculada no ciclo também resultam em produtividades semelhantes estatisticamente à produtividade com aplicação da lâmina total de irrigação calculada nas condições da Chapada Diamantina, Bahia (COELHO *et al.*, 2018).

21.6 Considerações finais

A irrigação deve estar integrada aos outros processos agropecuários, tais como adubação, correção da acidez do solo, controle fitossanitário, manejo fitotécnico e, principalmente, a conservação da água no solo. Os sistemas de irrigação já foram bem definidos para as fruteiras, mas suas relações com as mesmas quanto à adequação de fatores como vazão, espaçamento e quantidade de emissores, apesar das recomendações existentes, ainda não são de conhecimento de quem vende ou quem compra, principalmente a nível de pequeno e médios agricultores.

Atualmente existem técnicas de manejo de água de irrigação que se sustentam nas teorias da necessidade de reposição de água com base no estado hídrico do solo e

na evapotranspiração das fruteiras tropicais. São técnicas que utilizam de coeficientes das culturas específicos para cultivares e equipamentos para determinação da evapotranspiração ou para avaliação da umidade do solo de forma contínua e automática.

A necessidade de aumentar a eficiência de uso da água tem demandado técnicas que conservem a produtividade potencial das fruteiras com redução do dispêndio atual de água nessas fruteiras. Nesse contexto, tecnologias vêm sendo agregadas para quantificação das demandas de água pelas fruteiras tropicais com o uso de imagens termais de alta resolução, o que consiste em importantes ferramentas para os produtores bem como para as políticas públicas de monitoramento da produção em larga escala.

Referências

- ALBUQUERQUE, J.A.S.; MEDINA, V.D.; MOUCO, M.A.D.; GENU, P.J.C.; PINTO, A.C.Q. **A cultura da mangaueira**. Embrapa (informações tecnológicas). Brasília. p.259-276, 2002.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION of the United Nations, **Irrigation and Drainage Paper**, 56, Rome, Italy. 1998.
- ALMEIDA, F.T. de; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; SÉRGIO, L. D.; MARIN, S.L.D.; GRIPPA, S. Análise econômica baseada em funções de resposta da produtividade versus lâminas de água para o mamoeiro no Norte Fluminense. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.675-683, Dec. 2004.
- ALMEIDA, O.A.; SOUZA, L.F.S.; REINHARDT, D.H.; CALDAS, R.C. Influência da irrigação no ciclo do abacaxizeiro cv. Pérola em área de Tabuleiro Costeiro da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.2, p.431-435, 2002.
- ARAUJO, J.P.C. de. **Crescimento e marcha de absorção de nutrientes de bananeira (Musa sp. AAA), 'Grande Naine' no primeiro ciclo de produção**. 2008. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- AZEVEDO, P.V.; SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, v.88, p.201-208, 2007.
- AZZOUZ, S.; EL-NOKRASHY, M.A.; DAHSHAN, I.M. Effect of frequency of irrigation on tree production and fruit quality of mango. **Agricultural Research Review**, v.55, n. 3, p59-66, 1977.
- BASSOI, L.H.; TEIXEIRA, A.H.C.; FILHO, J.M.P.L.; MOURA E SILVA, J.A.; GOMES DA SILVA, E.E.; RAMOS, C.M.C.; SEDIYAMA, G.C. Guidelines for scheduling of banana crop in Sao Francisco Valley, Brazil. II - Water consumption, crop coefficient, and physiological behaviour. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, p.464-467, 2004.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV- Imprensa Universitária, 625p., 2008.
- BORLAND, A.M.; GRIFFITHS, H.; HARTWELL, J.; SMITH, J.A.C. Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. **Journal of Experimental Botany**, v.60, n.10. p.2879-2806, 2009.
- BRITO, R.R.; FILGUEIRAS, R.; SANTOS, J.E.V.; LEDA, V.C.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; ZIMBACK, R.C. Índices de vegetação SAVI, NDVI e temperatura de brilho na caracterização da cobertura vegetativa do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, João Pessoa-PB, INPE, **Anais**, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.

- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa* spp.). **Experimental Agriculture**, v.45, p.333-371, 2009.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*): a review. **Experimental Agriculture**, v.48, p.1-14, 2012.
- CARVALHO, A.M. **Irrigação no abacaxizeiro**. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v.19, n.195, p.58-61. 1998.
- CARVALHO, S.L.C.; NEVES, C.S.V.J.; BÜRKLE, R.; MARUR, C.J. Épocas de indução floral e soma térmica do período do florescimento à colheita de abacaxi 'Smooth Cayenne'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, n.3, p.430-433, 2005.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; OLIVEIRA, S.L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. Socioeconomia, **Bahia Agrícola**, v.7, n.1, 2005.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; SILVA, A.J.P. **Irrigação da mangaueira em condições semiáridas do Nordeste**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura. 2007 (Documentos/Embrapa Mandioca e Fruticultura, ISSN 1809-4996; 166).
- COELHO, E.F.; FONSECA, N.; CARVALHO, G.C. Manejo de água de irrigação em mangaueira e aceroleira sob cultivo orgânico com uso do secamento parcial do sistema radicular. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura. **Comunicado técnico**, 168, 8p., 2018.
- COELHO, E.F.; LEDO, C.A.S.; SILVA, S.O. Produtividade da bananeira 'Prata-Anã' e 'grande Naine' no terceiro ciclo sob irrigação por microaspersão em tabuleiros costeiros da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v.28, n.3, p.435-438, 2006.
- COELHO, E.F.; LIMA, D.M.; FARIAS, M.A.; CALDAS, R.C. Crescimento do mamoeiro cultivar Tainung número 1 sob diferentes regimes de irrigação. In: XII CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 2002, Uberlândia. A inserção da agricultura irrigada no ciclo hidrológico com: segurança alimentar, revitalização hídrica e sustentabilidade ambiental, v.1, 2002.
- COELHO, E.F.; OLIVEIRA, A.M.G.; SILVA, J.G.F.; COELHO FILHO, M.A.; CRUZ, J.L. Irrigação e fertirrigação na cultura do mamão. In: SOUZA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Org.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, p.442-472, 2011.
- COELHO, E.F.; OLIVEIRA, F.C.; ARAÚJO, E.C.E.; VASCONCELOS, L.F.L.; LIMA, D.M. Distribuição do sistema radicular da mangaueira sob irrigação localizada em solo arenoso de tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.23, n.2, p.250-256, 2001.
- COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; ALMEIDA, F.P.; DONATO, S.L.; REIS, J.B.R.S. Técnicas de manejo de água de irrigação para reduzir a demanda de água em bananeira. Cruz das Almas: Embrapa CNPMF. **Circular Técnica**, n.128, 14p. 2019.
- COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; COELHO FILHO, M.A. Distribuição de raízes de mamoeiro sob diferentes sistemas de irrigação localizada em Latossolo de Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.27, p.175-178, 2005.
- COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; DONATO, S.L.R.; CRUZ, J.L.; OLIVEIRA, P.M.; CASTRICINI, A. Soil-water-plant relationship and fruit yield under partial root-zone drying irrigation on banana crop. **Scientia Agricola**, v.76, p.362-367, 2019.
- COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P. Irrigação da bananeira. In: SILVA, S.O.; FERREIRA, C.F. (Org.). **O Agronegócio da Banana**. 1. Ed. Brasília: Embrapa, v.1, p.443-470, 2016.
- COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; DONATO, S.L.R.; SANTANA JÚNIOR, E.B.; OLIVEIRA, P.M. Sistemas de irrigação localizada e manejo de água em bananeira. **Informe Agropecuário**, 36: p.62-73, 2015.

COELHO, E.F.; SILVA, A.J.P.; MAROUELLI, W.A.; COSTA, S.F. Manejo da água de irrigação. In: COELHO, E.F. (Org.). **Irrigação da bananeira**. 1. Ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, v.1, p.196-278, 2012.

COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L. Onde Posicionar Sensores de Umidade e de Tensão de Água do Solo Próximo da Planta para um Manejo mais Eficiente da Água de Irrigação. Cruz das Almas, BA: Embrapa mandioca e Fruticultura. **Circular técnica**. 6p. 2015.

COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L. Produtividade do mamoeiro, cultivar Tainung nº1, sob diferentes manejos de irrigação nos tabuleiros costeiros do Nordeste. **Magistra**, v.22, p.35-40, 2010.

COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L.; CARVALHO, J.E.B. Distribuição de raízes e extração de água do solo em fruteiras tropicais. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 80 p., 2008.

COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L.; LIMA, D.M. Crescimento e produtividade do mamoeiro cultivar Sunrise solo sob irrigação nos tabuleiros costeiros da Bahia. **Magistra**, v.22, p.96-102, 2010.

COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F. Uso da regulação do *deficit* de irrigação e produtividade de mangueira Tommy Atkins em condições semiáridas. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA AGRICULTURA IRRIGADA, 2005, Teresina.

Anais... Teresina: ABID, 2005.1 CD-ROM.

COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; CRUZ, J.L. Uso da transpiração máxima de mamoeiro para o manejo irrigação por gotejamento em regiões úmidas e subúmidas. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 29 p., 2006. (Documentos; 106).

COELHO FILHO, M.A.; CRUZ, J.L.; COELHO, E.F.; SILVA, T.S.M.; MARIN, F.R. Aptidão agroclimática do estado da Bahia para o cultivo do mamoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2009, Belo Horizonte. **Resumos...** Mudanças Climáticas, Recursos Hídricos e Energia para uma Agricultura Sustentável, 2009.

COMBRES, J.C. Bilan énemktiaue et hidriaue de l'ananas, utilisation ootimale des wtentiaiiités climaiiaue; ' compte-rendu d'activités. **Auqu& ddou**: IRFA, p.108, 1983.

COSTA, S.C. **Níveis de irrigação e doses de potássio aplicados por gotejamento na cultura da bananeira para a região da Chapada do Apodi-CE**. Viçosa: UFV, 132p., 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2009.

COTE, F.X.; FOLLIO, M.; ANDRE, M. Photosynthetic crassulacean acid metabolism in pineapple in pineapple: diel rhythm of CO₂ fixation, water use, and effect of water stress. In: I INTERNATIONAL PINEAPPLE SYMPOSIUM, 1, p.334, 1992.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, FAO. **Irrigação e Drenagem**, 33, 306p., 1994

EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX J.C. (Ed.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014.

ESPINDULA NETO, D.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, J.G.F.; ZAMBOLIM, L.; SILVEIRA, S.F.R.; BERNARDO, S. Resposta do mamoeiro a diferentes lâminas de irrigação. In: Papaya Brasil. **Anais**, p.411-414. 2007.

EVANS, D.O.; SANFORD, W.G.; BARTHOLOMEW, D. P. Growing pineapple. In: BARHOLOMEW, D.P.; ROHRBACH, K.G.; EVANS, D.O. (Ed.). **Pineapple Cultivation in Hawaii**, 4-8, Manoa: HI: Fruits and Nuts 7, Cooperative Extension Service, University of Hawaii. 2002.

FERERES, E. Papel de la fisiologia vegetal em la microirrigación: recomendaciones para el manejo mejorado. In: SEMINARIO LATINOAMERICANO DE MICROIRRIGACIÓN, 4., 1981, Barquisimeto, Venezuela. **Anais....** Barquisimeto: IICA, p.1-23., 1981.

- FONSECA, N.; COELHO, E.F.; VIEIRA, R.S. *Deficit* hídrico na indução do florescimento e do aumento da produtividade da mangaueira 'Uba' em cultivo orgânico na região da Chapada Diamantina, Bahia. **Comunicado Técnico**, 165 Março de 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. 2010. FAO. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 23 set. 2010.
- FRANCO, L.R.L.; MAIA, V.M.; LOPES, O.P.; FRANCO, W.T.N.; DOS SANTOS, S.R. Crescimento, produção e qualidade do abacaxizeiro 'pérola' sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.27, n.2, p.132-140, 2014.
- HANAFI, M.M.; SHAHIDULLAH, S.M.; NIAZUDDIN, M.; AZIZ, Z.A.; MOHAMMUD, C.H. Crop water requirement at different growing stages of pineapple in BRIS soil. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.8, n.2, p.914-918, 2010.
- HEPTON, A. Cultural system. Chapter 6. In: BARTHOLOMEW, R.E.P.; ROHRBACH, K.G. (Ed.). **The Pineapple, botany, production and Uses**. Wallingford, UK: CAB International. p.69-107. 2003.
- HUANG, C.C.; LEE, C. Effect of irrigation on pineapple. **Taiwan Agricultural Q.**, v.5, n.1, p.50-58, 1969.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sidra**: Produção Agrícola Municipal. IBGE. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 set. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário. **Banco de dados agregados**. IBGE. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- JIMÉNEZ, V.M.; MORA-NEWCOMER, E.; GUTIÉRREZ-SOTO, M. Biology of the Papaya Plant R. In: MING, R.; MOORE, P.H. (Ed.). **Genetics and genomics of papaya, plant genetics and genomics: crops and models 10**, Springer Science Business Media, New York, 2014.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: VanNostrand Reinhold, 652 p., 1990.
- KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and plant water relations**. New Yor: Elsevier Academic Press., 500 p., 2005.
- KIST, B.B.; CARVALHO, C.; TREICHEL, M.; SANTOS, C.E. **Anuário Brasileiro da Fruticultura**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 90p., 2018.
- KIST, H.G.K.; RAMOS, J.D.; SANTOS, V.A.; RUFINI, J.C.M. Fenologia e escalonamento da produção do abacaxizeiro 'Smooth Cayenne' no Cerrado de Mato Grosso. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.992-997, 2011.
- KOTUR, S.C.; IYENGAR, B.R.; SHIVANANDA, T.N. Distribution of root activity in young 'Alphonso' mango (*Mangifera indica*) trees as influenced by season and growth. **Indian Journal of Agricultural Sciences**. v.67, n.3, p.113-116, 1997.
- LEVANON, S.; MARKOVICH, O.; GOZLAN, I.; ORTAL BAKHSHIAN, O.; ZVIRIN, A.; HONEN, Y., KIMMEL, R. Abiotic Stress Prediction from RGB-T Images of Banana Plantlets. arXiv, p.11597, 2011.
- LIMA, L.W.F. **Relações hídricas do abacaxizeiro cultivar Imperial**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2021.
- LIMA, R.S.N.; FIGUEIREDO, F.A.M.M.; MARTINS, A.O.; DEUS, B.C.S.; FERRAZ, T.M.; GOMES, M.M.A.; SOUSA, E.F.; GLENN, D.M.; CAMPOSTRINI, E. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. **Scientia Horticulturae**, v.183, p.13-22, 2015.
- LIU, X.; LI, F.; ZHANG, Y.; YANG, Q. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, [S.L], v.172, p.1-8, jul. 2016.

- LOPES, P.M.O. **Evapotranspiração da mangueira na região do submédio São Francisco**. 104p., 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Campina Grande, 1999.
- LU, P.; WOO, K.C.; LIU, Z.T. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. **Journal of Experimental Botany**, v.3, p.1771-1779, 2002.
- MARLER, T.E.; MICKELBART, M.V. Drought, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence of field grown papaya. **Journal for the American Society for Horticultural Science**, v.123, p.714-718, 1998.
- MELO, A.S.; NETTO, A.O.A.; NETO, J.D.; BRITO, M.E.B.; VIÉGAS, P.R.A.; MAGALHÃES, L.T.S.; FERNANDES, P.D. Desenvolvimento vegetativo, rendimento da fruta e otimização do abacaxizeiro cv. 'pérola' em diferentes níveis de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.93-98, 2006.
- MELO, D.M.; COELHO, E.F.; PEREIRA, B.L.S.; LIMA, L.W.F.; BARROS, D.L. Irrigation of papaya in a sandy loam soil in the semiarid of Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.15, n.1, e6193, 2020.
- MONTENEGRO, A.A.T.; BEZERRA, F.M.L.; LIMA, R.N. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará. **Engenharia Agrícola**, v.24, p.464-472, 2004.
- MOUCO, M.A.C. (Ed.). Cultivo da mangueira. 3. ed. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2015. (Embrapa Semiárido. Sistemas de Produção, 2). Disponível em: https://www.spo.cnptia.embrapa.br/listasptema?p_p_id=listaspportemaportlet_WAR_sistemasdeproducao6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column- &p_p_col_count=1&p_r_p_619796851_temaId=2106&listaspportemaportlet_WAR_si7. Acesso em: 16 mar. 2021.
- MOUCO, M.A.C. Indução floral da mangueira. Petrolina, PE: **Embrapa Semiárido**, 9p., 2004.
- PINTO, J.M.; SILVA, D.J.; COELHO, E.F. Irrigação e fertirrigação na cultura da manga. In: SOUSA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap.16, p.473-497, 2011.
- POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; GOTTARDO, R.D. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do mamoeiro. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.681-690, 2008.
- POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; PEREIRA, M.G.; MONNERAT, P.H.; GOTTARDO, R.D. Relação entre a produtividade do mamoeiro e o *deficit* hídrico (ky) na região Norte Fluminense. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.13, n.2, p.158-164, Apr. 2009.
- PRAKASH, K.; VIJAYAKUMAR, R.M.; BALAMOHAN, T.N.; SUNDHAR SINGH, S.D. Effect of drip irrigation regimes and fertigation levels on yield and quality of mango cultivar 'alphonso' under ultra high-density planting. **Acta horticulturae**, v.1066, p.147-150, 2015.
- RAMÍREZ, F.; DAVENPORT, T.L. Mango (*Mangifera indica* L.) flowering physiology. **Scientia Horticulturae**, Kidlington, v.126, p.65-72, 2010.
- RAVI, I.; UMA, S.; VAGANAN, M.M.; MUSTAFFA, M.M. Phenotyping bananas for drought resistance. **Frontiers in Physiology**, v.4, p.1-15, 2013.
- REIS, F.O.; CAMPOSTRINI E. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica potencial em mamoeiro do grupo 'Formosa' cultivado em condição de campo. **Bragantia**, p.815-822, 2008.
- REIS, F.O.; CAMPOSTRINI, E. Microaspersão de água sobre a copa: um estudo relacionado às trocas gasosas e à eficiência fotoquímica em plantas de mamoeiro. **Revista Brasileira Agrocência**, v.17, p.284-295, 2011.
- REIS, J.B.R.S.; COELHO, E.F.; OLIVEIRA, P.M.; COSTA, E.L.; CARVALHO, G.C. Irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.34, n.275, p.48-57, jul./ago. 2013.

- RÍOS, V.M.; HERRERA, M.D.G.; SUGITA, N.H.; LUACES, P.A. Water status response of pineapple using destructive and non-destructive indicators and their relations in two contrasting seasons. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, p.1-10, 2020.
- ROBINSON, J.C.; GALAN SAUCO, V. **Bananas and plantains**. 2. Ed. Cambridge: CAB, 311p., 2010. (Crop production science in horticulturae series, 19).
- SAN-JOSÉ, J.; MONTES, R.; NIKONOVA, N. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Red Spanish) field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v.45, p.370-384, 2007.
- SANT'ANA, J.A.V.; COELHO, E.F.; FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; DONATO, S.L.R. Distribuição de raízes de bananeira 'Prata-Anã' no segundo ciclo de produção sob três sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, p.124-133, 2012.
- SANTANA JUNIOR, E.B. **Caracterização solo-água, distribuição radicular e eficiência de uso de água pela cultura da bananeira sob diferentes configurações de irrigação localizada**. 103p., 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2012.
- SANTANA JR, E.B; COELHO, E.F.; CRUZ, J.L.; REIS, J.B.R.S.; MELO, D.M. de; PEREIRA, B.L.S. Trickle irrigation systems affect spatial distribution of roots of banana crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, p.326-332, 2020.
- SANTANA, M.J.; SOUZA, O.P.; CAMARGOS, A.E.V.; ANDRADE, J.P.R. Coeficientes de cultura do abacaxizeiro nas condições edafoclimáticas de Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.602-607, 2013.
- SANTOS, D.L. **Técnica do secamento parcial do sistema radicular para o mamoeiro no semiárido**. 106p., 2020. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.
- SANTOS, D.L.; COELHO, E.F.; CUNHA, F.F.; DONATO, S.L.R.; BERNADO, W.P.; RODRIGUES, W.P.; CAMPOSTRINI, E. Partial root-zone drying in field-grown papaya: Gas exchange, yield, and water use efficiency. **Agricultural Water Management**, v.243, p.1-11, 2021.
- SANTOS, M.R.; DONATO, S.L.R.; COELHO, E.F.; JUNIOR, P.R.F.C.; CASTRO, I.N. Irrigation deficit strategies on physiological and productive parameters of 'Tommy Atkins' mango. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.29, n.1, p.173-182, 2016.
- SANTOS, M.R.; LOURENCO, L.L.; DONATO, S.L.R.; SILVA, B.L.; CASTRO, I.N.; COELHO FILHO, M.A. Root system distribution and vegetative characteristics of Prata type bananas under different irrigation strategies. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, p.3806-3815, 2016.
- SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F. Evapotranspiração da bananeira sob dois sistemas de irrigação por microaspersão com base no balanço hídrico do solo. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, **Anais...**, 2007.
- SILVA, E.M.; PINTO, A.C.Q.; AZEVEDO, J.A. **Manejo da irrigação e fertirrigação na cultura da mangueira**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 77p., 1996. (Embrapa-CPAC Documentos, 61).
- SILVA, V.P.R. **Estimativa das necessidades hídricas da mangueira**. 129p. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2000.
- SILVA, J.G.F.; FERREIRA, P.A.; COSTA, L.C.; MELENDES, R.R.V.; CECOM, P.R. Efeitos de diferentes lâminas e frequências de irrigação sobre a produtividade do mamoeiro (*Carica papaya* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.597-601, 2001.
- SILVA, V.P.R. **Estimativa das necessidades hídricas da mangueira**. 129p., 2000. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba. UFPB, Campina Grande, 2000.
- SIMOES, W.L.; ANDRADE, V.P.; MOUCO, M.A.; SILVA, J.S. Produção e qualidade da mangueira 'kent' (*mangifera indica* l.) submetida a diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. RAMA - **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.14, p.1-11, 2021.

SIMOES, W.L.; ANDRADE, V.P.; MOUCO, M.A.; SILVA, J.S.; SILVA, W.O. Production and post-harvest of 'kent' Mango under different irrigation systems. **Engenharia na Agricultura**, v.28, p.397-404, 2020b.

SIMÕES, W.L.; COELHO, E.F.; MARTINEZ, M.A.; COELHO FILHO, M.A.; COSTAS, E.L.; GOMES, V.H.F. Produtividade e características físico-químicas dos frutos da lima ácida Tahiti sob diferentes disposições de microaspersores. **Water Resources and Irrigation Management**, 6: p.107-114, 2017.

SIMÕES, W.L.; FERREIRA, P.P.B.; MOUCO, M.D.C.; GUIMARÃES, M.; SILVA, J.A.B. da. Produção e respostas fisiológicas da mangueira cv. Keitt sob diferentes sistemas de irrigação no Submédio do São Francisco. **Irriga**, v.23, n.1, p.34-43, 2018.

SIMÕES, W.L.; MOUCO, M.A.C.; ANDRADE, V.P.M.; BEZERRA, P.P.; COELHO, E.F. Fruit yield and quality of Palmer mango trees under different irrigation systems. **Comunicata Scientiae**, v.11, p.e3254-e3254, 2020a.

SOARES, J.M.; COSTA, F.F. Irrigação. In: MARQUES, M.E.P.; MENEZES, E.A. (Ed.). **Informações técnicas sobre a cultura da manga no semi-árido brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Petrolina: Embrapa-CPATSA, p.41-80, 1995.

SOUZA, L.F.S.; REINHARDT, D.H. Pineapple. Chapter 10. In: JOHNSTON A.E. (Ed.). **Tropical fruits of Brazil, Horgen, Switzerland**: International Potash Institute (IPI, Bulletin 18), p.179-201 2007.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASSOI, L.H.; COSTA, W.P.L.B.; SILVA, J.A.M.S.; SILVA, E.E.G. Consumo hídrico da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.4550, 2002.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, n.10, p.1524-1537. 2008.

TURNER, D.W.; FORTESCUE, J.A.; THOMAS, D.S. Bananas and crop physiology. In: DAMATTA, F. (Ed.). **Ecophysiology of tropical tree crops**. New York: Nova Science Publishers, p.7-36. 2010.

WANG, J.; ZHANG, Y.; GONG, S.; XU, D.; JUAN, S.; ZHAO, Y. Evapotranspiration, crop coefficient and yield for drip-irrigated winter wheat with straw mulching in North China Plain. **Field Crops Research**, [S.L], v.217, p.218-228, 2018.

CAPÍTULO 22

22 IRRIGAÇÃO DE FRUTEIRAS SUBTROPICAIS (CITRICULTURA E VITICULTURA)

Regina Célia de Matos Pires, Marco Antônio Fonseca Conceição e Maurício Antônio Coelho Filho

Resumo

Neste capítulo, serão discutidos os aspectos gerais mais relevantes para a prática da irrigação de duas culturas frutíferas subtropicais (citricultura e viticultura), que também são cultivadas em regiões tropicais do Brasil. A sequência da apresentação do tema, para cada cultura, envolverá primeiramente uma abordagem geral a relevância do cultivo irrigado para as diferentes regiões produtoras do Brasil. Depois o capítulo tratará de aspectos voltados ao manejo de irrigação, como as necessidades de água da cultura, indicadores do solo e planta como estratégias para o manejo de água no campo; além de abordagem atual e muito importante ao se buscar o aumento da eficiência de uso de água das culturas, que é uso do manejo de irrigação com *deficit* hídrico controlado. No início da expansão da agricultura irrigada, esse tema não fazia muito sentido, desde que o objetivo era basicamente a maximização da produção. Hoje, com aumento dos riscos de conflitos pelo uso de água, cenários de mudanças climáticas e o conhecimento científico de que a técnica pode ser aplicada, principalmente em fruteiras, sem perdas relevantes de produção, com agregação de outros atributos como os qualitativos de frutos, essa é uma tendência científica e deve ser melhor entendida e aplicada na prática do manejo de irrigação para maximização da produtividade da água (kg [fruto] m^{-3} [água]) no campo.

22.1 Introdução

Apesar do Brasil ser o terceiro maior produtor mundial de frutas, sua participação no mercado internacional ainda é pequena. No entanto, considerando a necessidade de melhoria das condições de saúde com a conseqüente demanda de nutrientes diversos, o consumo mundial de frutas tende a aumentar. Aspecto relevante característico da fruticultura é a demanda de profissionais com diversos níveis tecnológicos que impactam positivamente na geração de emprego, renda com melhoria na qualidade de vida nas regiões onde se desenvolve.

A tecnologia de irrigação é muito aplicada à fruticultura e seus benefícios impactam positivamente desde a melhoria da produção, da qualidade de frutos até o aumento da janela de produção e mitigação dos riscos climáticos. Estes principalmente relacionados aos eventos de deficiência hídrica mais prolongada, que podem ocorrer em fases críticas da planta ou mesmo por eventos curtos de veranicos que possam afetar negativamente a qualidade de produção. Isso explica o grande interesse para adoção da irrigação nos pomares, mesmo em regiões com bons regimes pluviométricos.

A possibilidade de obtenção de produção em épocas distintas agrega valor ao produto, disponibilizando-o ao longo do ano aos consumidores nacionais e internacionais. Independentemente dos objetivos pretendidos pelo uso da irrigação nas fruteiras, esta precisa ser aplicada com eficiência e contribuir para sustentabilidade dos recursos hídricos. A eficiência do uso da água (EUA) na fruticultura irrigada requer a adoção de estratégias de manejo e tecnologias apropriadas à cada cultura.

Diversas são as fruteiras subtropicais cultivadas no Brasil, considerando as características climáticas, avanços em práticas culturais e melhoramento genético das espécies estas não se localizam apenas nas regiões subtropicais, sendo cultivadas em diversas regiões do país. Dentre as fruteiras subtropicais com plantio em grandes áreas e nas quais a irrigação é prática importante, destacam-se os citros e a videira, as quais serão abordadas neste capítulo separadamente. Serão destacados aspectos básicos e tecnologias de maior relevância aplicados à irrigação nessas culturas.

22.2 Citricultura

22.2.1 Mercado e área de cultivo

O Brasil é o maior produtor de laranjas e produtor e exportador de suco de laranja no mundo, sendo o terceiro país no consumo da fruta fresca (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2020). Segundo estimativas do USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2020) e Fundecitrus (FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA, 2020) a produção de laranjas no mundo será menor na safra atual devido a clima desfavorável no Brasil e México na safra anterior. No Brasil, esta redução deve atingir 25% e está relacionada a alternância de produção, e, em especial, no cinturão citrícola do Estado de São Paulo, triângulo e sudoeste de Minas Gerais e devido às ocorrências climáticas, com elevadas temperaturas do ar na época de pegamento de flores e frutos e precipitações abaixo da média esperada após as duas primeiras floradas em 2019 (FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA, 2020). Este cenário evidencia a grande influência da disponibilidade hídrica e da variabilidade climática na produção da cultura. Segundo o IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019) as áreas plantadas com laranjeiras, limoeiros e tangerineiras atingiram 592.814, 56.664 e 52.928 ha, respectivamente, em 2019. Apesar de menores áreas cultivadas para produção de limão e tangerina é importante considerar que estas têm valor agregado importante.

Conforme levantamento da área cultivada com citros pelo IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019) cerca de 70% da área plantada no Brasil concentra-se na região sudeste, seguida de 16% no Nordeste e 10% no Sul, mas há com cultivo em todas as regiões do Brasil. A área de laranjeiras segue aproximadamente a mesma proporção na área plantada. Em relação ao limoeiro, verificou-se que 65%, 16% e 12% as áreas encontram-se nas regiões sudeste, nordeste e norte do país, respectivamente. A área com tangerineiras distribuiu-se nas regiões sudeste, sul e nordeste, nas proporções de 48%, 40% e 7%, respectivamente.

A irrigação na citricultura no Brasil iniciou na década dos anos 60 para produção de frutas 'in natura' e para produção de mudas. Como benefícios pelo uso da irrigação destacavam-se aumento da produtividade e a qualidade dos frutos e melhoria nas mudas com crescimento, padronização, precocidade, facilidade para enxertia e redução de descartes (PIRES *et al.*, 2005). Na década dos anos noventa, a irrigação na citricultura foi adotada em pomares de frutas destinadas à indústria (produção de suco). Devido aos resultados positivos a adoção da irrigação para produção de frutas para indústria apresentou crescimento superior ao dos pomares de produção de frutas 'in natura' (PIRES *et al.*, 2005). Os benefícios da irrigação na citricultura podem ser diretos e indiretos, destacando-se melhorias como crescimento das plantas, floração, pegamento dos frutos, antecipação da florada, produtividade e qualidade. Apesar de ser cultura perene, Pires *et al.* (2011) verificaram grande aumento de produtividade de laranjeiras Pêra com uso do gotejamento no primeiro ano após a instalação do sistema em pomar de plantas adultas na região sul do Estado de São Paulo. Nesta área é

importante ressaltar a importância de adequação do manejo da água e da nutrição associados. Além dos benefícios positivos da irrigação na produção e qualidade é importante destacar a expectativa relacionada à melhoria nas condições das plantas pela redução de estresses abióticos para evitar o depauperamento das plantas tornando-as menos suscetíveis à ocorrência de pragas e doenças.

O cultivo em regiões áridas e semiáridas não deixa dúvidas sobre a relevância e importância da irrigação nos citros, principalmente para médias e pequenas propriedades. Outro fator relevante associado ao aumento na adoção da irrigação nos citros no Brasil está associado ao uso do porta-enxerto Limoeiro Cravo em grande parte dos pomares no Brasil. Bassanezi *et al.* (2006) reportaram adoção em 80 a 90% dos pomares no Estado de São Paulo. Este porta-enxerto, dentre outras características apresenta boa resistência ao *deficit* hídrico. O surgimento da morte súbita dos citros (MSC) em 1999 associado ao fato das plantas enxertadas em limoeiro Cravo serem susceptíveis à MSC; para conviver com doença foram adotados outros porta-enxertos tolerantes à doença, mas, sensíveis ao *deficit* hídrico quando comparado ao limoeiro Cravo (POMPEU JUNIOR; BLUMER, 2008). Tal fato também aumentou o interesse pela irrigação na citricultura, em especial, no Estado de São Paulo, triângulo e sudoeste de Minas Gerais.

Além dos fatos relevantes associados ao aumento no uso da irrigação na citricultura há que se destacar os cenários climáticos das regiões de cultivo (PEREIRA *et al.*, 2018). Por meio de abordagem relativista, os autores verificaram, em análise de tendências históricas que mudanças significativas ocorreram nos três primeiros meses da estação chuvosa no Estado de São Paulo (outubro, novembro e dezembro) com aumento do *deficit* hídrico. Este período equivale a fase crítica à deficiência hídrica nos citros nesta região (floração, pegamento de flores e frutos e crescimento de frutos). Diversas pesquisas reportam o aumento de produtividade dos citros pelo uso da irrigação no Brasil e no mundo. A porcentagem de aumento é variável considerando a região, as práticas culturais adotadas, a combinação copa-cavalo, o manejo e o método de irrigação e o clima. Aumentos variáveis de 20% a mais de 100% pelo uso da irrigação foram observados no Brasil em diferentes regiões (COELHO *et al.*, 2006; PIRES *et al.*, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2020, dentre outros). Em regiões com precipitações naturais acima de 1000 mm por ano pode se verificar aumentos diferentes dependendo a distribuição das precipitações naturais (SILVEIRA *et al.*, 2020).

De acordo com levantamentos do setor produtivo a área irrigada na citricultura ao final da década de 90 equivalia a apenas 1,5% do total cultivado. Devido aos benefícios diretos e indiretos alcançados pelo uso da irrigação anteriormente abordados e os cenários climáticos o aumento percentual da área irrigada em relação à cultivada foi de 10% para 30% da área cultivada em citros no Estado de São Paulo e triângulo e sudoeste de Minas Gerais no período entre 2000 e 2019 (BASSANEZI *et al.*, 2020). O percentual de 30% foi relatado pelo inventário dos pomares de citros do Estado de São Paulo e Triângulo e sudoeste Mineiro, com área atingindo cerca de 120.000 ha (Fundo de Defesa da Citricultura - Fundecitrus 20/21 Censo). O gotejamento é utilizado em aproximadamente 90% da área sendo o restante irrigado por aspersão. A maior concentração encontra-se na região norte do Estado de São Paulo. Cerca de 80% das plantas irrigadas é em pomares de meia estação e tardias (Pêra Rio, Valência e Natal). Da área irrigada apenas 5,5% concentram-se em pomares de 1 a 2 anos. Assim, verifica-se, nesta região, a concentração da irrigação em plantas em fase de produção. Na região do Triângulo Mineiro há relato de 80% da área citrícola é irrigada. Apesar de acentuado uso de irrigação por gotejamento, a microaspersão também é adotada, em especial em pomares em áreas menores, o pivô central, além do autopropelido na aspersão, e há ainda, viabilidade de irrigação por sulcos, para aplicações em fases específicas em região

com disponibilidade de recursos hídricos. Para melhoria da eficiência do uso da água com a utilização do pivô central é necessário o uso de aspersores adaptados à cultura, como a meia altura, entre a superfície do solo e a linha principal, ficando os emissores de 0,3 a 0,9 m da superfície do solo conforme descrito por Coelho *et al.* (2006). A adoção da fertirrigação em pomares cítricos é interessante e contribui para redução dos custos de produção e potencializa a eficiência do uso de nutrientes.

22.2.2 Necessidades hídricas

A necessidade de água das plantas cítricas varia com a combinação copa-cavalo, práticas culturais, estágio de desenvolvimento, uso e manejo das irrigações, idade e condições climáticas, que afetam a absorção e transporte de água na planta, abertura estomática e transpiração (PIRES *et al.*, 2005).

O menor uso de água dos *Citrus* spp. em relação a outras espécies se relacionam a baixa condutância estomática do dossel vegetativo (CARR, 2012) e elevada regulação estomática com aumento do *deficit* de pressão de vapor a do ar (SAMPAIO *et al.*, 2021). A elevada resistência das folhas dos citros à difusão do vapor d'água acarreta maior eficiência do uso da água em relação a outras fruteiras, como a macieira, por exemplo (SHALHEVET; LEVY, 1990). Tal fato, também pode ser evidenciado comparando-se a transpiração das plantas cítricas similares cultivadas em distintas condições de demanda climática (BOMAN *et al.*, 2002).

A floração dos citros ocorre após período de 'repouso aparente'. Em regiões subtropicais, ocorre pelas baixas temperaturas no período de outono-inverno e nos trópicos e em regiões com estação seca pronunciada a floração é desencadeada após reidratação do solo (CARR, 2012). Ainda, em algumas regiões subtropicais a floração pode ocorrer devido a baixas temperaturas e/ou deficiência hídrica dependendo das condições climáticas do ano (RIBEIRO *et al.*, 2006). Em áreas irrigadas, a escolha do momento de retornar à irrigação após período de repouso é fundamental pois afeta a floração, pegamento de frutos e por conseguinte a produtividade. A duração do período de repouso determina a intensidade da floração. Zanini e Pavani (1998) salientam que *deficit* hídrico em excesso é prejudicial, acarretando abortamento de flores e frutos, por outro lado, *deficit* insuficiente, acarreta florescimento pouco vigoroso. Como duração média do período alguns autores citam cerca de dois meses, podendo a indução ocorrer por baixas temperaturas no inverno (cerca de 10°C) nos sub trópicos e por período de *deficit* hídrico (precipitação mensal menor que 50 a 60 mm) nos trópicos (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Após o período de repouso, as irrigações devem proporcionar adequada disponibilidade hídrica para favorecer florescimento, pegamento das flores e frutos. Desta forma, a época de início das irrigações deve considerar o estado hídrico das plantas, as condições climáticas do ano, como a temperatura do ar e/ou a deficiência hídrica. A estratégia adotada para o período de repouso aparente na imposição de *deficits* hídricos, desde que as condições climáticas do ano possibilitem, podem favorecer a indução floral em épocas mais adequadas, seja para produção em período de entressafra, ou promover antecipação da floração e evitar que a fase de pegamento dos frutos ocorra em época com ocorrência de elevadas temperaturas do ar elevadas o que pode acarretar intensa queda de frutos. A antecipação do início das irrigações para promoção da floração tem sido utilizada para redução da queda de frutos conforme relatado por Fundecitrus (FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA, 2020) na região do triângulo mineiro.

Pavão (2016) e Silveira *et al.* (2020) contabilizaram o número de horas de frio desde 1º de maio até o total acumulado de no mínimo 300 horas abaixo de 13°C para início das irrigações e promoção de floração na região sudoeste do Estado de São Paulo

em laranjeiras Valência e Pêra. No período estudado a adoção deste critério resultou em boa floração com valores de produtividade das laranjeiras irrigadas variando de 40,4 a 73,2 t ha⁻¹ em cinco safras da laranjeira Pêra (SILVEIRA *et al.*, 2020) e de 40,8 a 72,8 t ha⁻¹ em três safras de laranjeira Valência (PAVÃO, 2016). A soma de 300 horas de temperaturas abaixo de 13°C foi considerado fator forte de indução forte para floração dos citros em estudo realizado por Ribeiro *et al.* (2006).

Em relação à indução por ocorrência de deficiência hídrica Ribeiro *et al.* (2006) consideraram indução fraca a soma de deficiência hídrica de 10 a 30 mm, indução moderada com deficits de 31 a 69 mm e indução forte valores de deficiência acima de 70 mm, provenientes de balanço hídrico climatológico dos meses de junho, julho e agosto. Os autores adotaram 100 mm como armazenamento de água no solo de 100 mm para diferentes regiões do Estado de São Paulo. Na Itália no cultivo de limoeiro, Barbera *et al.* (1985) relatam que a suspensão da irrigação por 30 dias e a não ocorrência de chuvas impuseram boas condições para floração do limoeiro, momento no qual o potencial de água nas folhas antes do amanhecer atingiu valores de -1,3 MPa (BARBERA *et al.*, 1981, *apud* BARBERA *et al.*, 1985). Valores de potencial de água nas folhas ao meio-dia de -2,25 MPa e -3,5 MPa, indicaram estresse moderado e severo em lima ácida Tahiti, respectivamente (SOUTHWICK; DAVENPORT, 1986). Pires *et al.* (2008) relacionaram aos melhores resultados na produção, de laranjeira Valência enxertada em limoeiro Cravo, ao início das irrigações após o período de dormência aparente na região central do Estado de São Paulo com -2 MPa de potencial de água nos ramos ao meio-dia.

Estudos que avaliam o efeito da duração e intensidade do *deficit* hídrico durante o período de repouso na produtividade de plantas cítricas em condições de clima subtropical, são necessários e importantes. Em regiões nas quais o *deficit* hídrico é o principal indutor da floração, ou também pode ser associado à ocorrência de baixas temperaturas, vários produtores utilizam nos pomares áreas de observação em plantas específicas. Nestas áreas realizam coroas ao redor das plantas e aplicam água uma a duas vezes por semana e seguem observando a resposta das plantas em floração. Nas semanas seguintes se inicia aplicação de água em outras coroas de plantas. Isto possibilita o acompanhamento visual das plantas em relação à ocorrência da floração. Com a identificação visual de floração intensa nas plantas das coroas iniciam-se as irrigações.

A inflorescência pode ser acompanhada ou não de folhas nos ramos. Inflorescência sem folhas, em geral, surgem primeiro e tem baixa probabilidade de gerar fruto viável, por outro lado, flores em inflorescências folhosas têm maior probabilidade de pegamento dos frutos, e, ainda quanto menor o número de flores no caule, maior o pegamento dos frutos (CARR, 2012). Apesar do grande número de flores que pode ocorrer na planta pequena porcentagem atinge a maturação. Carr (2012) relata a ocorrência de até 250.000 flores por árvore em laranjeira, mas, após a abscisão de botões de flores, ovários, frutos em desenvolvimento menos de 1% atinge a maturidade (IGLESIAS *et al.*, 2010 *apud* CARR, 2012). A frutificação e a abscisão de flores e frutos nos citros consistem em processo complexo, regulado por fatores genéticos, metabólicos e ambientais que podem atuar sequencialmente, simultaneamente ou sobrepostos, e ainda não são totalmente compreendidos (IGLESIAS *et al.*, 2010 *apud* CARR, 2012).

Após o florescimento, ocorre a queda natural de frutos, conhecida no hemisfério norte como 'June drop' e, no hemisfério sul, como 'December drop'. *Deficit* hídrico durante a floração reduz a frutificação e acarreta acentuada queda de frutos (DOORENBOS; KASSAM, 1979), e, na fase inicial dos frutos pode aumentar a queda e

reduzir a taxa de crescimento. Segundo estes autores para produção de limão a ocorrência de *deficit* hídrico no verão pode ser adotada, se possível, para promover floração e produção ao longo do ano. Nos citros o período crítico ao *deficit* hídrico vai de a floração até o fruto atingir 2,5 cm de diâmetro. *Deficit* hídrico durante a fase de expansão do fruto afeta o tamanho final do fruto, mas pode aumentar o conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) e ácidos (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Outro fator importante a considerar é que *deficit* severo durante a expansão dos frutos pode desencadear a floração, o que é indesejável nesta fase (exceto para limões). Kriedemann e Barrs (1981) relatam que o crescimento de frutos de Satsuma paralisou quando o potencial de água das folhas ao amanhecer atingiu -0,8 MPa. Assim verifica-se a importância de considerar a intensidade e a duração da deficiência hídrica. O tempo decorrido desde a floração até a maturação dos frutos pode levar de 7 a 14 meses.

Frutos de limão tem período de floração mais longo do que outros Citrus spp. e podem ser colhidos ao longo do ano (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A massa média dos frutos pode ser afetada com a disponibilidade de água no solo, manejo da irrigação (PAVÃO, 2016; SILVEIRA *et al.*, 2020) e número de frutos e porte das plantas. Além da disponibilidade hídrica, a temperatura do ar também afeta a maturação e qualidade dos frutos (POZZAN; TRIBONI, 2005). A concentração de sólidos solúveis totais e a acidez são parâmetros importantes para caracterização da qualidade do fruto e previsão da época de colheita. Neste sentido, Pavão (2016) e Silveira (2019) correlacionaram os graus-dia-acumulados (GDA) ao *Ratio* e apresentam regressões para estimativa do momento de colheita. Para isto adotaram a soma de GDA a partir de 1 de abril e 1 de março, para laranjeiras Valência e Pêra, respectivamente. A deficiência hídrica pode aumentar a concentração de sólidos solúveis no suco, mas esta relação depende muito das condições climáticas do ano e do critério do manejo das irrigações. Há tendência de maior concentração de SST em plantas com maior *deficit*, mas há anos em que este fato não ocorre e plantas adequadamente irrigadas apresentam bons resultados (PAVÃO, 2016; SILVEIRA, 2019). Desta forma, verifica-se a necessidade de estudos em busca da melhor resposta em produtividade e qualidade associado ao manejo da água e da fertirrigação.

A necessidade hídrica dos citros varia de acordo com as condições de solo, clima, condução do pomar, população de plantas, método e manejo da irrigação, dentre outros aspectos. A demanda de água é elevada nos períodos de brotação, emissão de botões florais, frutificação e início de desenvolvimento dos frutos, sendo menor nos períodos de maturação, colheita e período de repouso. Doorenbos e Kassam (1979) citam que o consumo de água na produção do pomelo tende a ser mais elevado que para outras espécies de citros. Valores de consumo anual variando de 750 a 1800 mm são encontrados na literatura considerando a diversidade de locais, combinação copa-cavalo, práticas culturais adotadas e manejo e método de irrigação (DOORENBOS; KASSAM, 1979; PARSONS; WHEATON, 2000; SHIRGURE *et al.*, 2000; GARCIA PETILLO; CASTEL, 2007; JAMSHIDI *et al.*, 2020).

Dependendo da região de cultivo e dos objetivos na condução do pomar as irrigações podem ter caráter complementar às chuvas, eventual quando aplicadas em condições ou épocas e objetivos específicos e ainda caráter essencial como em regiões com precipitação anual reduzida (regiões áridas e semiáridas). Considerando o dinamismo envolvido no processo de transferência da água no sistema solo-planta-atmosfera e as variações no consumo de água das plantas relacionado às condições de cultivo local é necessário o monitoramento, seja esta via clima, solo ou planta ou ainda a associação destes indicadores. Em caráter complementar as chuvas valores totais anuais de irrigação 400 a 600 mm por ano são relatados. Por exemplo, na região nordeste da Bahia o total anual da irrigação de 442 mm alcançou melhor produtividade

em laranjeira Pêra com 4 anos de idade (COELHO *et al.*, 2003). Shalhevet e Levy (1990) relataram recomendações para a região central citrícola aplicações semanais - 10, 15, 25, 45 e 65 L dia⁻¹ planta⁻¹ para pomares do primeiro ao quinto ano após plantio, respectivamente. Já a partir do sexto ano, recomendam 100 L dia⁻¹ planta⁻¹ (4,0 a 4,5 mm dia⁻¹).

O consumo de água das plantas ou a evapotranspiração da cultura (ETc) representa a quantidade de água que deve ser repostada ao solo para manter o crescimento em condições ideais. A ETc pode ser medida por diferentes métodos. A partir de estudos que avaliam a ETc e a evapotranspiração de referência (ETo) ou demanda climática, valores de coeficiente de cultura (Kc) são estimados. Assim, com a utilização da relação $ETc = ETo \cdot Kc$ (ALLEN *et al.*, 1998), estima-se o consumo de água das plantas. Desta forma, a variação climática da região é incorporada pela ETo, que depende apenas das variáveis meteorológicas, e expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes (ALLEN *et al.*, 1998). O Kc possibilita estimativa de ETc para condições ideais, sem limitações ao desenvolvimento das plantas, integrando as diferenças entre a ETc e a ETo. Assim, o Kc varia predominantemente com as características da cultura e as práticas adotadas que afetam o desenvolvimento das plantas, com isto é um coeficiente com significado físico e biológico importante. Os valores de Kc podem ser adotados a partir de modelo simples, com valor único, ou por modelo de partição, que considera separadamente as perdas por transpiração das plantas (Kcb) e por evaporação (Ke) (ALLEN *et al.*, 1998).

Vários trabalhos de pesquisa realizados com diferentes culturas indicam que valores medidos de Kc são dependentes também do método de estimativa de ETo. A indicação de método único de estimativa de ETo, o método de Penman-Monteith, conforme recomendado pela Food and Agriculture Organization (SMITH *et al.*, 1992) contribuiu bastante para estimativa do consumo de água pelas culturas irrigadas e indicações de valores de Kc e possibilidade de uso em diferentes regiões do mundo. Na literatura encontram-se valores de coeficiente de cultivo (Kc) para citros em diferentes locais e diversidade de combinações copa-cavalo, manejo e método de irrigação e ainda indicações de valores médios obtidos a partir de análises de diversos estudos (DOORENBOS, KASSAM, 1979; BOMAN, SYVERTSEN, 1991; CASTEL, 1996; IAFFE, ARRUDA, 1997; ALLEN *et al.*, 1998; BOMAN, PARSONS, 2002; ALVES JÚNIOR, 2006; GARCÍA PETILLO, CASTEL, 2007; KOBAYASHI *et al.*, 2009; MARIN; ANGELOCCI, 2011; MARTARELLO *et al.*, 2012; PEDDINTI; KAMBHAMMETTU, 2019; JAMSHIDI *et al.*, 2020).

O Kc varia com o desenvolvimento das plantas, e que no cultivo de limão e de pomelo os valores devem ser maiores (cerca de 10 a 15%) em relação aos observados para laranjeiras (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Em pomar de laranjeira Valência sobre porta-enxerto citrumelo Swingle, com cinco anos de idade, na Flórida, Boman e Syvertsen (1991) encontraram valores de Kc para o período que antecede o florescimento de 0,5 (final de outono e inverno) e no período de crescimento dos frutos e amadurecimento Kc de 1,0 (final de primavera e verão). Ainda na região da Flórida, Boman e Parsons (2002) recomendam valores de Kc para pomares de plantas adultas de 0,9 durante o inverno a 1,0 nas demais fases do ciclo. Castel (1996) avaliando Kc de laranjeiras irrigadas por gotejamento também verificou variação sazonal durante o ciclo de cerca de 0,6 a 0,8. O autor avaliou que as perdas de água por evaporação diretamente da superfície do solo representaram diferentes proporções em períodos chuvosos e secos. Nos períodos secos, as perdas por evaporação do solo representaram de 8% a 30% da ETc, por outro lado, em períodos chuvosos ocorreu aumento, representando de 30% a 50% da ETc. Iaffe e Arruda (1997) observaram em condições de deficiência hídrica, em plantas de Baianinha e Hamlin nos porta-enxertos laranja

'Caipira' e limão 'Cravo', que o Kc reduziu até próximo de zero. Após período de seca prolongada, não houve pronta recuperação do Kc com reinício das chuvas.

Allen *et al.* (1998) compilaram informações sobre Kc os quais encontram-se na Tabela 1. Os autores apresentam também metodologia para estimativa do consumo de água e de ajuste de Kc para condições de molhamento parcial do solo conforme o método de irrigação; equações para ajuste de acordo com o clima; equações para estimativa do valor diário de Kc; metodologia para condição de deficiência hídrica; e, valores de Kc por modelo de partição.

Tabela 1. Coeficiente de cultura (Kc), coeficiente de cultura basal (Kcb) e altura máxima das plantas (Hx, m) para condições sem estresse hídrico, para os citros em clima subúmido, com umidade relativa mínima de 45% e velocidade do vento aproximadamente 2 m s⁻¹, considerando a estimativa de ETo pela equação FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (Penman-Monteith), para pomares conduzidos com e sem plantas infestantes, para diferentes porcentagens de cobertura do solo (CS, %) promovida pelo dossel das plantas avaliadas com o sol a pino. Kci: período de repouso e início do florescimento. Kcm: período de floração e desenvolvimento vegetativo pleno até os frutos atingirem 2,5 a 3,0 cm de diâmetro. Kcf: estágio final de formação e maturação dos frutos (ALLEN *et al.*, 1998).

CS	Kci ¹	Kcbi ²	Kcm	Kcbm ²	Kcf	Kcbr ²	Hx
Pomar sem plantas invasoras ³							
70	0,70	0,65	0,65	0,60	0,70		4
50	0,65	0,60	0,60	0,55	0,65		3
20	0,50	0,45	0,45	0,40	0,55		2
Pomar com plantas invasoras ³							
70	0,75	0,75	0,70	0,70	0,75	0,75	4
50	0,80	0,75	0,80	0,75	0,80	0,75	3
20	0,85	0,80	0,85	0,80	0,85	0,85	2

¹ Kci são para condições típicas de manejo de irrigação e de molhamento do solo. Para molhamentos frequentes, como irrigações diárias ou a cada dois dias, estes podem aumentar substancialmente e atingir valores de 1,0 a 1,2. ² Kcb representam situações de superfície de solo seca e devem ser utilizados quando: $Kc = Kcb + Ke$. ³ Kcm é menor do que os de início e final, devido ao fechamento de estômatos durante o período de ETo de pico. Para climas úmidos e subúmidos, onde há menor controle de estômatos pelos citros, valores para Kci, Kcm e Kcf podem ser aumentados de 0,1 a 0,2, conforme Rogers *et al.* (1983).

Alves Júnior (2006) avaliou o Kc em lima ácida Tahiti irrigada por gotejamento, em Piracicaba, em pomar com 357 plantas ha⁻¹, e observou variação de 0,6 a 1,22, e de Kcb entre 0,4 a 1,0. García Petillo e Castel (2007) avaliaram Kc de laranjeiras Valência no Uruguai irrigadas por gotejamento e em média verificaram Kc de 0,69, mas com variação sazonal de 0,60 no verão, outono 0,77, primavera 0,80 e 0,87 no inverno. Kobayashi *et al.* (2009) avaliaram Kc e ETc de laranjeira Pêra irrigada por gotejamento em Casa Branca, Estado de São Paulo. O Kc médio do ciclo foi de 0,71 e foi próximo da umidade na primavera-verão e reduziu no outono. Em Piracicaba, Estado de São Paulo, Marin e Angelocci (2011) avaliaram em pomar de lima ácida Tahiti com 7 anos de idade, com população de plantas de 178 por hectare e obtiveram valores de Kc de 0,24 ± 0,12 (inverno) e 0,65 ± 0,11 (verão). Martarello *et al.* (2012) estimaram o Kc de laranjeira Pêra enxertada em tangerineira Sunki irrigada por gotejamento por balanço hídrico de campo na região central do Estado de São Paulo e verificaram valor médio anual de 0,80. A densidade de plantio era de 588 plantas ha⁻¹.

Peddinti e Kambhammettu (2019) avaliaram Kc de laranjeiras adultas, com altura de 2,5 a 3 m e com as plantas proporcionando 70% de cobertura do solo na Índia, com valores de 0,43, 0,78 e 0,80 para os estádios K_{Ci} , K_{Cm} e K_{Cf} de forma similar ao apresentado por Allen *et al.* (1998). Em clima semiárido no Irã, Jamshidi *et al.* (2020) avaliaram Kc como valor único e com modelo de partição em pomar de laranjeiras Washington navel, espaçadas 5 x 5 m (400 plantas ha⁻¹) irrigadas por gotejamento. O valor médio de ETc foi 5,11 mm dia⁻¹ e consumo anual de 1800 mm (85% relacionado a transpiração e 15% a evaporação), e variação de Kc de 0,67 no inverno até 0,96 no verão para plantas sem *deficit* hídrico.

Considerando o dinamismo que envolve o consumo de água das plantas é relevante criteriosa seleção do valor de Kc. De acordo com os valores da literatura verificam-se variações nos valores e também sazonal do Kc. Várias pesquisas apontam redução de Kc no inverno. Tal fato deve estar associado à variação na condutância estomática dos citros nas diferentes estações do ano, que é menor no período de inverno conforme verificado por Ribeiro e Machado (2007), associado também a redução da temperatura do ar e do solo. Ainda, em alguns locais, verificou-se redução do consumo de água das plantas cítricas no verão, mesmo com irrigações adequadas, denotando a limitação pelo controle estomático. Para seleção do Kc alguns fatores podem ser considerados, tais como a similaridade da área na qual o Kc foi estimado e a do pomar ao qual se fará o manejo da água, a combinação copa-cavalo, as condições edafoclimáticas, a densidade de plantio, práticas culturais, método e manejo das irrigações, dentre outros. Em relação a densidade de plantio é importante considerar que ocorreu grande variação no número de plantas por hectare, passando de 338 plantas por hectare ao final dos anos 70 para 616 plantas por ha em 2019 e para pomares em formação 625 no mesmo ano (Fundecitrus 20/21 censo).

22.2.3 Manejo das irrigações com indicadores do solo e sistema radicular

22.2.3.1 Água disponível

O manejo da água utilizando o solo como indicador monitora direta ou indiretamente o teor de água no solo ou o potencial matricial de água no solo. Para este monitoramento é importante conhecer alguns parâmetros, dentre estes, destacam-se a capacidade de retenção de água do solo, a distribuição e profundidade do sistema radicular e critérios para manejo que auxiliem a tomada de decisão de momento e quantidade de água a ser aplicada.

A capacidade de retenção de água no solo é obtida pela diferença entre o limite superior de retenção de água no solo (capacidade de campo) e o limite inferior de retenção da água no solo (ponto de murcha permanente). Para fins de manejo de água é fundamental conhecer a umidade na capacidade de campo e garantir que após as irrigações este valor não seja ultrapassado, pois caso isto ocorra haverá redução da aeração do solo o que afeta negativamente a absorção de água das plantas cítricas. Por outro lado, a umidade do solo no ponto de murcha permanente representa a condição na qual o solo não pode mais suprir água às plantas e estas entram em murchamento permanente não se recuperando durante a noite. Para fins de manejo das irrigações os critérios adotados ficam distantes do ponto de murcha, mas este auxilia na estimativa da capacidade de retenção da água dos solos. Prado (2013) apresenta a capacidade de retenção de água de diferentes tipos de solos tropicais de acordo com a classificação do solo em mm de água por cm de profundidade do solo (Figura 1). Esta informação auxilia a estimativa inicial da capacidade de retenção de água dos solos até que determinações locais sejam possíveis.

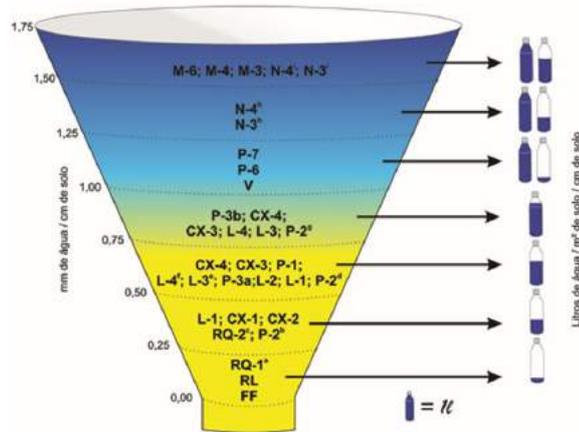


Figura 1. Capacidade de retenção de água no solo para diferentes tipos de solo do Brasil (PRADO, 2013).

Para estimar a capacidade de água disponível do solo para cultura há necessidade de conhecer a profundidade e a distribuição do sistema radicular das plantas. A disponibilidade de água do solo interfere na atividade radicular. Sob excesso de umidade no solo há comprometimento da aeração e sob *deficit* hídrico, redução da atividade radicular. O sistema radicular dos citros se caracteriza por raiz pivotante, que pode ser substituída por raízes de grande porte em condições de campo, e, a partir destas se ramificam densa concentração de raízes laterais nas camadas superficiais do solo (KRIEDEMANN; BARRS, 1981; MEDINA *et al.*, 2005; CARR, 2012). No início da década dos anos 80, Kriedemann e Barrs (1981) reportaram que as interconexões no sistema radicular das plantas poderiam garantir que a água aplicada a determinada parte do sistema radicular é disponível para toda a árvore.

22.2.3.2 Sistema radicular

Para fins de irrigação, a profundidade efetiva e a distribuição das raízes no perfil são importantes para estimativa da água disponível bem como para instalação de sensores para monitoramento. A profundidade desde a superfície do solo até onde se concentram cerca de 75 a 80% das raízes finas responsáveis pela absorção de água e de nutrientes chama-se de profundidade efetiva. A distribuição espacial das raízes ao redor da planta também é importante para escolha de locais para instalação de sensores de umidade ou extratores de solução do solo, melhor posicionamento de emissores (gotejadores e microaspersores) e realização de amostragens de solo. O crescimento radicular depende de vários fatores do solo que o circunda, dentre estes destacam-se aspectos químicos, físicos e biológico, tais como compactação do solo, fertilidade e acidez do solo, presença de elementos tóxicos no perfil do solo, aeração do solo, método e manejo das irrigações, densidade de plantio, porta-enxerto (KRIEDEMANN; BARRS, 1981; MORGAN *et al.*, 2007), idade e porte das plantas (MONTENEGRO, 1960; MORGAN *et al.*, 2007) dentre outros fatores. Desta forma, avaliações locais são importantes.

Avaliações de sistema radicular dos citros tem sido determinada por diversos autores. Em cultivo de Tahiti sobre limão Cravo com 3,5 anos de idade, 74% das raízes finas foram encontradas até 30 cm de profundidade e 50% até 25 cm de profundidade (RIBEIRO, 1993). Com relação à distribuição horizontal das raízes, a maior parte se concentrou entre 0,70 e 1,40 m do tronco da planta. Ainda em cultivo de Tahiti sobre limão Cravo com oito anos de idade, Vieira e Gomes (1999) encontraram 80% das raízes até 50 cm de profundidade, permanecendo 50% até 25 cm, similar ao observado por Ribeiro (1993). Com relação à distribuição espacial, 80% das raízes finas se

concentraram até 1,5 m do tronco da planta. Para a mesma combinação copa e porta-enxerto Machado e Coelho (2000) observaram maior concentração até 40 cm de profundidade e a maior parte das raízes situou-se entre 50 e 75% do diâmetro de projeção da copa. Santos (2002) observou em região semiárida em lima ácida 'Tahiti' irrigada por microaspersão a maior absorção de água ocorreu até 1,5 m de distância do tronco das plantas na linha de plantio e até 0,5 m de profundidade. A até 0,5 m de distância do tronco a absorção de água ocorreu até 1,1 m de profundidade. Marin e Angelocci (2011) verificaram maior concentração radicular de lima ácida 'Tahiti' com 7 anos de idade, em porta-enxerto de *C. limonia* nos primeiros 0,4 m de profundidade, apesar das raízes terem atingido 1,5 m de profundidade, em Piracicaba. Simões *et al.* (2019) verificaram que a extração de água pelas raízes de lima ácida Tahiti em região semiárida no norte de Minas Gerais irrigadas por microaspersão foi mais significativa (85 a 90%) ocorreu desde a superfície do solo até 0,625 m de profundidade.

A distribuição do sistema radicular de laranjeiras sob irrigação localizada deve considerar se as irrigações são complementares às chuvas, típicas de regiões úmidas, ou, se em caráter pleno como nas regiões áridas e semiáridas. De acordo com Coelho *et al.* (2003), o uso da irrigação durante 6 meses do ano em laranjeiras resultou maior volume de solo explorado (profundidade e expansão lateral das raízes e com maior densidade) em comparação ao cultivo sob sequeiro. A máxima concentração radicular situou-se entre 0,5 a 2,0 m do tronco e entre a superfície do solo até 1,5m de profundidade, com maior concentração e uniformidade de raízes na linha de plantio. Pires *et al.* (2011) verificaram que no primeiro ano após a instalação da irrigação por gotejamento em pomar de plantas adultas de laranjeira Pêra em tangerina Cleópatra houve grande concentração radicular na região do bulbo úmido e que a maior concentração de raízes ocorreu entre 0,1 a 0,3 m de distância do gotejador e até 0,25 m de profundidade. Alves Junior *et al.* (2012) avaliaram sistema radicular de laranjeiras Valência irrigadas por microaspersão e verificaram que nas plantas irrigadas houve maior densidade radicular na camada de 0,15 a 0,3 m de profundidade nas plantas irrigadas em comparação àquelas não irrigadas. Pires *et al.* (2013) verificaram que cerca de 80% das raízes de laranjeira Natal enxertada em citrumelo *Swingle* irrigadas por gotejamento com e sem irrigação deficitária encontraram-se até 0,6 m de profundidade e grande concentração de raízes de 0,1 a 0,2 m de distância dos gotejadores.

De acordo com os resultados observados em condições de campo, com enfoque nos estudos realizados no Brasil a profundidade efetiva variou de 40 a 60 cm de profundidade, com maior concentração na linha de plantio e com maior concentração até cerca de 1,5 m do tronco das plantas, ou ainda a aproximadamente de 1/3 à 2/3 do diâmetro da copa.

22.2.3.3 Critérios e indicadores para manejo das irrigações pelo solo

O manejo das irrigações via solo pode adotar diversos critérios, dentre estes o que indica que as irrigações devem ser aplicadas até valores críticos sejam atingidos, seja após o consumo de determinada porcentagem da água disponível do solo ou até o valor de potencial matricial crítico da água no solo. Estes valores críticos correspondem a resultados de pesquisas nos quais se observaram como limites para não reduzir a produtividade. A água disponível desde o limite superior de retenção de água no solo até estes valores críticos considera-se que a água no solo está facilmente disponível às plantas. Quando se adota o critério de atingir um limite crítico para fazer a irrigação, de um modo geral, se faz para irrigações com intervalos entre irrigações maiores. Por outro lado, para irrigações por gotejamento, em muitos casos a lâmina de irrigação a ser aplicada, com adoção deste critério, pode ser elevada considerando que a irrigação não

resulta em molhamento em 100% da área. Sendo assim, a aplicação de lâminas de irrigação elevadas para gotejamento poderá acarretar perdas por percolação abaixo da profundidade do sistema radicular. Desta forma, ressalta-se a importância de sincronia do critério de manejo adotado com as características do método de irrigação.

A porcentagem da água disponível que pode ser consumida antes das irrigações para não acarretar prejuízo ao crescimento e produção é denominada fator de consumo de água ou fator de depleção (f), e está relacionado à suscetibilidade da cultura ou de cada estágio de crescimento ao estresse hídrico. Como fator de depleção para citros encontram-se recomendações que variam desde 15 a 60% do consumo da água disponível do solo. Para irrigações realizadas com maior frequência, como para gotejamento, pode-se adotar o valor de 15% e para irrigações com intervalos maiores, permitir consumo maior da água disponível do solo. O uso de valor variável do fator de depleção de água ao longo do ciclo da cultura também pode ser realizado com uso de valores menores no período crítico ao *deficit* hídrico (20 a 40%) e maiores (50 a 70%) nos demais períodos (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN *et al.*, 1998). Doorenbos e Kassam (1979) apresentaram recomendação de valores variáveis em função da demanda atmosférica local, variando desde 80%, 70%, 60%, 50%, 45%, 42,5%, 37,5%, 35% e 30% para épocas com valores de evapotranspiração de referência de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mm dia⁻¹, respectivamente. Assim, verifica-se que com aumento da demanda climática recomendam-se reduzir o fator de depleção, e, por conseguinte, irrigações com intervalos menores. Para condições de clima quente e seco, com elevada ETc, o valor de " f " deverá ser de 10 a 25% menor que os médios e para baixos valores de ETc, o de " f " pode ser acrescido em 20%.

Allen *et al.* (1998) salientam que expressar a tolerância ao estresse hídrico em função do fator de depleção de água no solo, não é a forma mais correta, pois a taxa de absorção de água pelas raízes é influenciada diretamente pelo estado de energia da água no solo que pode ser obtido pelo potencial da água no solo. O potencial de água no solo possui relação específica com a umidade nos diferentes solos, com isso, o valor do fator de depleção (f) também é função do tipo de solo. Para os argilosos, os valores de " f " podem ser reduzidos de 5 a 10%, e, para os arenosos, devem ser acrescidos em 5 a 10%. Carr (2012) indica como valores adequados para fins de manejo das irrigações para os citros permitir o consumo de 40% da água disponível do solo no período crítico ao *deficit* hídrico dos citros (floração, pegamento de frutos e fase de queda de frutos) e de 60 a 70% nos demais estádios.

A lâmina de irrigação a ser aplicada também pode considerar a umidade do solo no momento da irrigação e com isto estimar quanto é necessário para elevar a umidade do solo à capacidade de campo ou limite superior de retenção de água no solo. Esta umidade do solo pode ser medida por diferentes métodos e ainda pode estar associada ao potencial de água crítico para a cultura. A partir do momento em que o solo atinge esse valor de potencial, determina-se a umidade por meio de uma curva de retenção de água do solo e estima-se a lâmina de irrigação a ser aplicada.

O potencial de água crítico determina o momento em que a irrigação se faz necessária para que produtividades elevadas sejam alcançadas. Um dos primeiros estudos relacionados ao uso e manejo da água em laranjeiras no Brasil foi realizado em pomar de plantas jovens, em Ribeirão Preto, no qual as irrigações foram realizadas sempre que o potencial de água no solo atingisse -150 kPa (BARRETO *et al.*, 1976) e os autores ressaltam que aumentos maiores na produtividade poderiam ser alcançados com uso de intervalos entre irrigações menores, com manejo adotando valores menos negativos de potencial de água no solo.

Para uso em manejo das irrigações dos citros há recomendações de potencial de água no solo variáveis de -10 a -70 kPa (BOMAN; SYVERTSEN, 1991; PARAMASIVAM *et al.*, 2000; SHIRGURE *et al.*, 2000). Critério de manejo com irrigações quando o potencial de água no solo atingia -15 kPa foram adotadas por Boman e Syvertsen (1991). Shirgure *et al.* (2000) encontraram bons resultados com irrigações quando o potencial de água atingiu -50 kPa. Paramasivam *et al.* (2000) utilizaram como potencial de água crítico para a laranjeira Hamlin sobre Cleópatra com 25 anos de idade irrigada por microaspersão valor de potencial de água crítico de -10 kPa e -15 kPa nas fases que antecedem o florescimento até pegamento dos frutos e crescimento e amadurecimento dos frutos respectivamente em solo arenoso na Flórida. Silveira (2019) utilizando irrigações por gotejamento com frequência diária adotou o critério para o solo em questão de após as irrigações deveriam atingir -10 kPa em pomar de laranjeira Pêra na região sudoeste do Estado de São Paulo.

Considerando resultados das pesquisas e a adoção de sistemas que aplicam água com alta frequência, como o gotejamento recomenda-se trabalhar em faixa de variação de potencial de água no solo de -15 a -30 kPa na camada de maior concentração radicular (até 1/3 a 1/2 da profundidade efetiva das raízes). Com irrigações aplicadas em intervalos mais espaçados as irrigações podem ser realizadas quando o potencial de água no solo atingir -50 kPa. De forma, similar ao relatado quando do uso do fator de depleção podem-se adotar a condução das irrigações em faixa menos negativa de potencial no período crítico ao *deficit* hídrico das plantas e nas demais fases admitir manejo em faixa um pouco mais negativa de potencial.

22.2.3.4 Manejo da água com indicadores da planta

Considerando que o desenvolvimento das plantas e a produção são os objetivos fundamentais do cultivo o uso de parâmetros que envolvem medição do estado hídrico das plantas, taxas de crescimento de partes das plantas, trocas gasosas, fluxo de seiva, dentre outros são relevantes. No entanto, devido aos custos, nível tecnológico envolvido, cuidados necessários e as interações que vários destes parâmetros apresentam com o ambiente, embora relevantes estes métodos têm sido utilizados principalmente em pesquisas. O uso destes métodos em pesquisas é fundamental para entendimento dos processos e efeitos resultantes de critérios de manejo das irrigações ou mesmo em resposta a condições ambientais adversas.

Alguns autores trabalharam com a relação da transpiração por área foliar da lima ácida 'Tahiti' em relação a evapotranspiração de referência (Figura 2). Esta abordagem foi adotada por Marin *et al.* (2001) e Coelho Filho (2002). Aumento na transpiração em função de aumento da área foliar para a mesma evapotranspiração de referência pode ser verificada (Figura 2a). Quanto à relação entre transpiração por unidade de área foliar e evapotranspiração de referência, Coelho Filho (2002) verificou tendência linear (Figura 2b). Tal relação possibilita a estimativa da transpiração das plantas conhecendo-se a área foliar e a demanda climática e o coeficiente que os relacionada por meio de modelo climatológico. A Figura 3 apresenta variação diária do fluxo de seiva e da radiação líquida de lima ácida Tahiti, em Piracicaba em cinco dias consecutivos. Coelho Filho (2002) verificou certa defasagem do fluxo de seiva em relação à radiação líquida e relata que isto está relacionado à capacitância dos ramos das plantas pronunciada em plantas adultas.

Silva *et al.* (2005) verificaram que o consumo de água da lima ácida Tahiti reduziu com consumo de 60% da água disponível do solo, já a condutância estomática, as trocas gasosas, a fotossíntese e o potencial de água das folhas reduziram com a depleção de 40% da água disponível no solo.

O uso de medidas taxas de crescimento e contração do tronco para manejo das irrigações foi avaliado por Velez *et al.* (2007) em pomar de Clementina de Nules (*C. clemantina*) enxertada em citrange Carrizo (*C. sinensis*), na Espanha. Os autores objetivaram que a contração máxima do tronco não excedesse 125% daquela observada na planta controle bem hidratada por três meses após ao "June drop" (no hemisfério norte que equivale ao "December drop" no hemisfério sul). Este limite de contração assegurava que o potencial de água dos ramos não era menor que -1,3 MPa ao meio-dia local. O tratamento com *deficit* reduziu a lâmina de irrigação em 18% e 12% em cada ciclo, respectivamente. A produtividade com a irrigação deficitária não se diferenciou daquela alcançada nas plantas adequadamente irrigadas. Ainda com manejo de água em pomar com irrigação deficitária na Espanha, García-Tejero *et al.* (2011) verificaram o potencial de uso da diferença entre a temperatura do dossel e a do ar como parâmetro sensível do estado hídrico das plantas, indicando a potencialidade do uso de termômetro infravermelho para monitoramento da água das plantas, auxiliar no manejo da água.

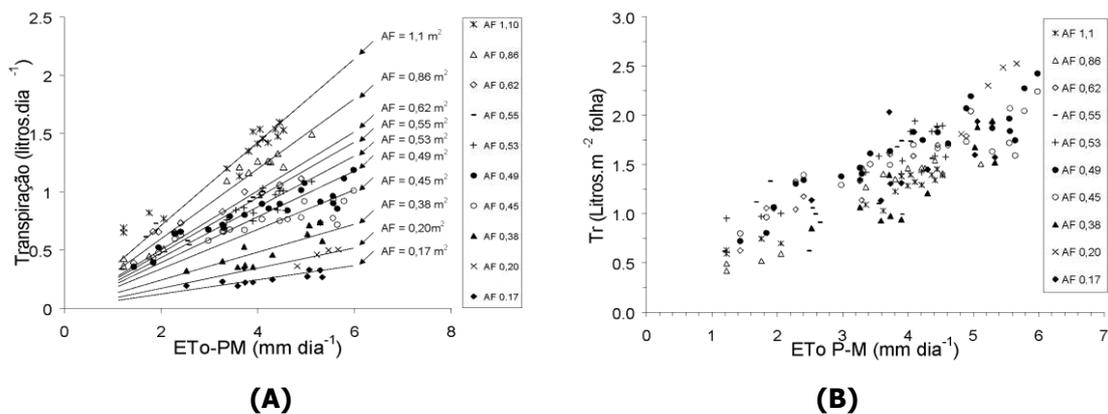


Figura 2. Transpiração máxima de plantas da lima ácida 'Tahiti' por classe de área foliar total (A), e a transpiração máxima por área foliar (Tr) (B) de plantas da lima ácida 'Tahiti' ambos relacionados a evapotranspiração de referência (Penman-Monteith - ETo-PM) (COELHO FILHO, 2002).

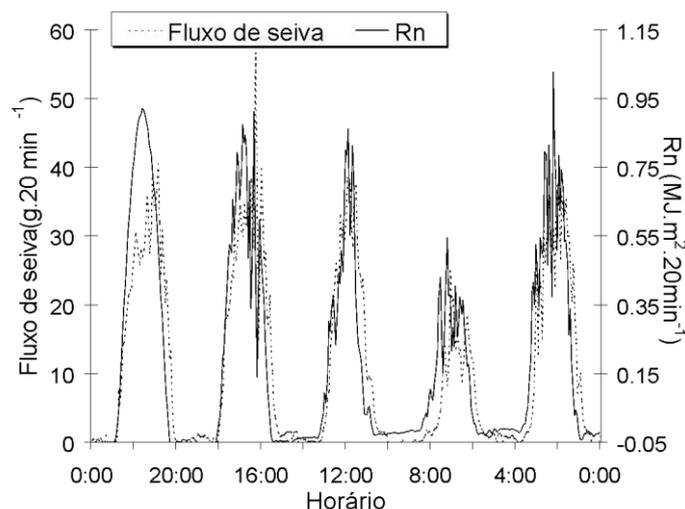


Figura 3. Curso diário do fluxo de seiva (transpiração máxima) de plantas da lima ácida 'Tahiti' e da radiação líquida em planas com 0,6 m² de área foliar nos dias julianos 337 ao 341 de 2001, Piracicaba, SP (COELHO FILHO, 2002).

Com o objetivo de estabelecer critérios para irrigação baseados no estado hídrico de tangerineiras Satsuma (*Citrus unshiu*) na África do Sul, Dzikiti *et al.* (2010) avaliaram vários parâmetros e horários de medição. Melhor caracterização do estado hídrico das plantas com medição ao meio-dia do potencial hídrico dos ramos foi verificada. Por outro lado, o potencial hídrico das folhas antes do amanhecer não apresentou sensibilidade para indicar a ocorrência de *deficit* hídrico leve. Dzikiti *et al.* (2011) verificaram a possibilidade de uso da refletância do dossel como indicador de mudanças relativas no estado hídrico de laranjeiras Valência.

Carr (2012) compilando informações relacionadas ao estado hídrico das plantas indica que irrigações deficitárias em citros considerando o potencial de água dos ramos a -1,3 MPa não representa fator limitante da produtividade. O uso do potencial hídrico dos ramos na caracterização do estado hídrico tem sido utilizado na identificação do momento de início das irrigações para promoção de floração (BARBERA *et al.*, 1985; PIRES *et al.*, 2008) conforme reportado no item de relações hídricas.

Em pomar de plantas adultas de mandarina na Espanha, Conesa *et al.* (2018) obtiveram correlação linear da máxima contração do diâmetro do tronco com o potencial de água dos ramos medido ao meio dia de plantas adequadamente hidratadas e daquelas sob irrigação deficitária. Assim, verifica-se também o potencial de uso deste indicador para manejo das irrigações.

Simões *et al.* (2019) avaliaram a transpiração de plantas de lima ácida Tahiti no norte de Minas Gerais irrigadas por microaspersão com diferentes configurações de vazão e posição dos emissores em relação às plantas. Maior transpiração das plantas e eficiência no uso da água ocorreu com um microaspersor ($Q = 70 \text{ L h}^{-1}$) entre duas plantas na linha de plantio.

O uso de indicadores nas plantas tem relevante importância. Alguns equipamentos e possibilidades de uso e aplicações foram relatadas e certamente aumentarão o uso dado o potencial para alcançar a eficiência no uso da água necessária para a agricultura irrigada.

22.2.3.5 Balanço hídrico e manejo da irrigação

O balanço hídrico envolve todas as entradas e saídas de água que envolvem o volume de solo explorado pelas raízes. A irrigação (I), a precipitação (P), escoamento superficial advindos de áreas contíguas e a ascensão capilar compõem as entradas do balanço hídrico, enquanto o consumo de água pela cultura (ETc) e as perdas por percolação profunda e escoamento superficial compõem as saídas. Todos esses componentes podem ser estimados e acarretam variação do armazenamento da água no solo. Assim a variação do armazenamento da água no solo no perfil do solo reflete o balanço destes fluxos de entrada (positivos) e saída (negativos).

Com adequação do manejo das irrigações as perdas por percolação profunda devem ser minimizadas e as entradas e saídas advindas do escoamento superficial podem desconsideradas para fins de balanço hídrico de campo (LIBARDI, 2012). As entradas de água provenientes da ascensão capilar devem ser consideradas quando o lençol freático é pouco profundo, condição não muito comum na maior parte das áreas cultivadas e irrigadas na citricultura. De forma simplificada, o balanço hídrico de campo pode ser expresso pela relação $\Delta h = P + I - ETc$. A variação do armazenamento de água do solo (Δh), em um dado intervalo de tempo, pode ser conhecida por medidas sequenciais de umidade no perfil do solo. Conhecendo-se as precipitações, as irrigações e a variação do armazenamento de água no solo, pode-se estimar o consumo de água da cultura em condições de campo. A variação do armazenamento de água no solo pode

ser estimada em diferentes camadas ao longo do perfil do solo conforme a distribuição do sistema radicular. Informações detalhadas podem ser encontradas em Libardi (2012).

Considerando que o monitoramento da água no solo, seja umidade ou potencial, é realizado de forma pontual para representar as plantas de determinada parcela ou talhão, a escolha do local de monitoramento é importante para garantir representatividade das informações. Considera-se como local com boa representatividade áreas com mesma face de exposição solar, similaridade das condições de solo, plantas sadias e com porte que representem a maior parte da população a que se pretende representar.

O controle e as informações para tomada de decisão da irrigação a partir de dados da água no solo poderão ocorrer de acordo com os critérios adotados, dentre estes: (i): reposição da umidade do solo considerando a umidade do dia ou do momento e aplicando a diferença para que a umidade referente a capacidade de campo seja atingida; (ii): realização, ou não, da irrigação seguindo critério de nível crítico para a cultura, seja pelo consumo da porcentagem de água disponível ou por potencial de água no solo crítico; (iii): realizar as irrigações com objetivo de manter a umidade do solo ou o potencial de água crítico no solo em determinada faixa de variação em profundidade específica considerada para este fim. Neste último caso ressalta-se a importância de se conhecer a faixa de controle e o valor do limite superior de retenção de água no solo com o próprio sensor. Para tanto avalia-se a capacidade de campo em condições de campo com o uso do sensor que será adotado e nas profundidades de interesse.

Com a adoção da irrigação localizada, em especial, há variação da umidade do solo na região do bulbo úmido formado. Portanto, o posicionamento de sensores precisa considerar, além da distribuição do sistema radicular, a distância em relação a planta e também em relação ao emissor. Em grande parte das situações tem-se observado que a distância entre 0,10 e 0,15 m do gotejador tem se mostrado adequada para fins de manejo da água e manutenção de faixa adequada de variação. Ainda, neste caso específico precisa-se selecionar a profundidade que deverá indicar a condução das irrigações na faixa adequada. O sensor deverá ser posicionado na profundidade efetiva das raízes, e, nesta, na região mais ativa e com maior concentração de raízes. De um modo geral, esta profundidade equivale a $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ da profundidade efetiva das raízes. Este sensor deverá indicar que após as irrigações este deverá se atingir o valor equivalente ao limite superior de retenção de água do solo (capacidade de campo). Caso este não atinja o valor almejado o tempo de irrigação deverá ser aumentado em pequenos incrementos, ou diminuir o intervalo entre irrigações. Após mais um período de monitoramento a adequação ou não das irrigações a necessidade de novo ajuste poderá ser verificada. De forma similar, caso após as irrigações o valor da capacidade de campo tenha sido excedido reduz-se o tempo de irrigação com ajustes de pequena variação e prossegue o monitoramento para verificar a adequação.

A partir do monitoramento da água no solo, confecção de planilha e figura com a variação ao longo do tempo nas diferentes profundidades monitoradas faz-se as adequações necessárias para evitar irrigações excessivas ou deficientes. É importante lembrar que a variação na umidade do solo entre as irrigações é esperada e a magnitude dessa flutuação, que será trabalhada pelos critérios técnicos, precisa considerar também o método de irrigação e as características e cuidados relacionados a estes. Com a aspersão sobre a copa, de um modo geral, a superfície do solo é totalmente molhada e o intervalo entre as irrigações é maior que o utilizado com irrigação localizada, em especial se utilizado autopropelido. Já com uso do pivô central o intervalo entre irrigações é menor que no autopropelido. O uso do gotejamento ou microaspersão

precisa considerar que as irrigações são mais frequentes e que há molhamento parcial da superfície do solo. No manejo da irrigação com intervalos entre irrigações maiores há possibilidade de uso de lâminas de irrigação considerando os limites críticos ao *deficit* hídrico. Por outro lado, irrigações frequentes demandam estratégia de manejo com a manutenção da umidade do solo em condições adequadas e aplicações de lâminas menores, evitando-se excesso de irrigação, principalmente no gotejamento.

Há grande número de opções de sensores para monitoramento da água no solo no mercado, seja para medição da umidade ou do potencial de água no solo. O uso destes sensores além de auxílio para o manejo da irrigação possibilita conhecer a efetividade das precipitações naturais ocorridas, o quanto e até que profundidade determinada precipitação contribuiu para o balanço hídrico. Há que se considerar que qualquer aporte de chuvas que faça com que o armazenamento da água no solo ultrapasse seu limite de retenção, o excesso deve ser considerado como perda por percolação profunda. Com relação ao número de sensores, recomenda-se instalar de duas a três estações de controle em cada parcela ou talhão a se irrigar e em cada estação de controle, de dois a três sensores nas profundidades de 1/3, 1/2 e no limite da profundidade efetiva ou a 1/2 e no limite da profundidade efetiva das raízes. Se houver a opção de melhorar o número de sensores, aumentar o número de sensores instalado na região mais ativa das raízes (1/3 a 1/2). Em pomares cítricos mais adensados, o posicionamento dos sensores pode ser na distância média entre duas plantas. Em pomares com espaçamentos mais largos, geralmente a bateria de sensores pode ser posicionada entre 0,5 e 1,5 m de distância do tronco da planta, onde há maior concentração radicular (COELHO *et al.*, 2011).

O manejo das irrigações também pode ser realizado com o uso do balanço hídrico climatológico, levando em consideração as características do solo e planta, aos se estimar a evapotranspiração da cultura (ETc) por meio da evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente de cultura (Kc) (Tabela 1). Neste caso as irrigações devem ser aplicadas de acordo com o consumo de água das plantas diariamente ou variável ao se considerar nas simulações o consumo desde o dia da última irrigação até atingir o limite crítico de porcentagem da água disponível no solo. Quando se associa indicadores há aumento da confiabilidade no processo de tomada de decisão da irrigação. Neste caso pode-se fazer a estimativa do quanto irrigar baseado no clima e nas plantas e adotar o uso de sensores de monitoramento de água no solo para indicar se o valor de Kc adotado está devidamente ajustado para a área em questão.

22.2.3.6 Manejo de irrigação com *deficit* hídrico

Como visto anteriormente, a prática da irrigação deve envolver grande conhecimento técnico para em cada situação específica definir o quanto e quando irrigar, ou seja, o manejo de irrigação é fundamental para que se alcancem maiores eficiências de irrigação e de uso de água. Mesmo porque, com a mesma lâmina de água aplicada e acumulada num ciclo de produção pode-se submeter ou não a cultura níveis diferenciados de estresse hídricos. Nesse aspecto, mais importante que os totais aplicados é a definição de quando aplicar e qual nível de estresse que a planta pode suportar para não afetar a produção e qualidade dos frutos. Ou quais níveis de estresse deve-se aplicar para que se maximizem os ganhos líquidos. Esse equilíbrio é que vai ser responsável pela manutenção da produtividade em níveis aceitáveis economicamente, garantindo aumento da eficiência de uso de água.

Buscando-se não apenas maximizar a produtividade, mas encontrar caminhos para o uso racional de água no processo de produção, várias pesquisas foram realizadas nas últimas décadas relacionado ao manejo da irrigação com *deficit* hídrico controlado.

O principal objetivo do manejo com *deficit* é aumentar a eficiência do uso de água ou a produtividade da água (kg m^{-3}), permitindo a expansão da área irrigada ou mesmo viabilizar a produção em locais com escassez hídrica.

Grande parte dos estudos com o manejo de *deficit* controlado em citros ocorreram em regiões semiáridas, a exemplo da Espanha; e também no semiárido brasileiro e também há resultados positivos no sudeste brasileiro, região de clima subtropical. Resultados alcançados ao longo de vários anos demonstraram a viabilidade da técnica, com economia no uso de água e manutenção da produtividade e qualidade de frutos de laranjeiras, tangerineiras, limas, limões e pomelos.

O conhecimento das respostas das plantas às condições distintas de disponibilidade de água no solo e demanda atmosférica é importante para que estratégias de manejo possam alcançar respostas positivas quando da implementação da irrigação deficitária. Manejo com *deficit* permite, quando bem manejado, controle da indução floral, modelagem do fluxo vegetativo das plantas, aumento da produtividade por volume de copa e qualidade de frutos. Para os citros, as respostas das plantas ao *deficit* de água no solo combinados ou não como estresse salino são dependentes também da combinação copa-cavalo.

Diferentes tipos de estratégias de manejo com *deficit* controlado podem ser aplicados para esse propósito: (i) *deficit* controlado em épocas específicas de desenvolvimento dos frutos, o que se chama de irrigação com *deficit* regulado (RDI); (ii) *deficit* de irrigação fixos ao longo do ciclo produtivo; e (iii) irrigação com *deficit* ao longo do ciclo produtivo, alternando-se a distribuição de água no solo (PRD); ou associação destas estratégias.

22.2.3.7 *Deficit* hídrico controlado em fases do desenvolvimento dos frutos

Este manejo tem por objetivo aplicar *deficit* controlado em fases menos sensíveis da planta e manter a irrigação plena no período crítico, no qual ocorre impacto na produtividade e qualidade de frutos. Para isso, é necessário melhor compreensão de como a fase de produção de citros é dividida. Além do período de floração, o crescimento e o desenvolvimento de frutos cítricos após a antese se dividem em três fases típicas e suas principais características (MEDINA *et al.*, 2005): Fase I (atividade metabólica intensa e divisão celular), Fase II (rápido crescimento) e Fase III (redução das taxas de crescimento e maturação dos frutos). Geralmente o período de maior sensibilidade da planta ao *deficit* hídrico, afetando severamente a produção é a fase de floração e início de frutificação (Fase I), principalmente quando o estresse vem associado a elevadas temperaturas e baixas umidades do ar, provocando abortamento de flores e de frutos além do normal e impactando o número total de frutos por planta no ciclo, que geralmente não é compensada por florações posteriores em cultivos de sequeiro (TONET *et al.*, 2002).

Estratégias de manejo para antecipação de floradas para períodos com temperaturas mais amenas e/ou irrigações mais conservadoras na Fase I, reduzem os riscos de queda de produção. Por outro lado, como verificado por Silva *et al.* (2006) a suspensão da irrigação de limeira ácida 'Tahiti' a partir da brotação, em diferentes períodos fenológicos reduziu o potencial de água das folhas das plantas não irrigadas; mas sem efeito negativo no crescimento da brotação e dos frutos, na abscisão, produção e qualidade dos frutos formados das plantas. Tal fato pode ter ocorrido devido a cultivo em solo com boa fertilidade e região na qual os picos de temperaturas não são críticos a para planta. Os efeitos do estresse se acentuam na FASE II, impactando a taxa de crescimento de frutos (RUIZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2010) e qualidade (GARCÍA-TEJERO *et al.*,

2010), com acúmulo progressivo de sólidos solúveis e redução da acidez do suco; e principalmente quando *deficit* aplicado na FASE III (CARR, 2012). Em geral, o *deficit* afeta especialmente as características organolépticas, aumentando a acidez e sólidos solúveis (GARCÍA-TEJERO *et al.*, 2010).

Em clima semiárido a recomendação se baseia na aplicação de estresse controlado na FASE II. Portanto a técnica parte do conhecimento de que o acúmulo de matéria seca dos frutos durante o estresse hídrico controlado na FASE II é compensado por uma rápida recuperação do status hídrico da planta após o período de estresse e aceleração do crescimento de frutos compensa a menor taxa de crescimento no período de estresse (RUIZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2000). Assim, a disponibilidade de água em níveis ótimos ao retornar à irrigação, é importante para compensar o crescimento. É importante salientar que além das características edafoclimáticas da região, as respostas dependem também da combinação copa-cavalo adotada. Efeitos do *deficit* hídrico são menores em porta-enxertos tolerantes à seca, e por exemplo a qualidade dos frutos, especialmente a acidez, pode não ser tão afetada (ROMERO-TRIGUEROS *et al.*, 2020).

A aplicação da estratégia de irrigação em uma das fases ou em todas, promove respostas fisiológicas variáveis e deve ser bem planejada e monitorada para que o estresse não comprometa a produção e qualidade final de frutos. O monitoramento pode ser baseado em respostas fisiológicas das plantas como o potencial da água nas folhas ou ramos (GARCIA-TEJERO *et al.*, 2011), variações espectrais do dossel das plantas (JORGE; INAMASU, 2014) ou do solo, como a disponibilidade de água na zona radicular ou potencias de água (PIRES *et al.*, 2005). Os valores críticos dos indicadores de estresse dependem do clima da região, época do ano, fertilidade do solo, combinação copa e porta-enxerto utilizado, dentre outros aspectos.

É importante o conhecimento das respostas fisiológicas das plantas no ambiente de produção para correto manejo do *deficit* de irrigação, estabelecendo-se os limites críticos dos índices de estresse adotados indicando necessidade da irrigação. Como índices, avaliações dos potenciais da água folha/ramo em torno próximos de -1,2 MPa, como limiares máximos para leituras realizadas antes do amanhecer; ou valores que podem superar -1,7 MPa ao meio dia avaliados em tangerineiras irrigadas por gotejamento (GONZÁLEZ ALTOZANO; CASTEL, 2000); limiar de -1,3 MPa para não haver efeitos no tamanho de frutos de tangerineiras (GONZÁLEZ ALTOZANO; CASTEL, 2003) e de -1,4 MPa (BALLESTER *et al.* 2011); limiar máximo de -2 MPa (leituras ao meio dia) para laranja irrigada por gotejamento (GASQUE *et al.*, 2016) e irrigação superficial (GARCIA-TEJERO *et al.*, 2011). O tamanho final dos frutos, bem como a produtividade dependem da duração e da intensidade do estresse aplicado (BALLESTER *et al.*, 2011).

Para limeira ácida 'Tahiti' enxertada em limoeiro 'Cravo' no semiárido brasileiro, resultados evidenciaram a possibilidade de aplicação de deficits aplicados nas três fases de desenvolvimento de frutos em solos profundos, de textura arenosa do perímetro irrigado de Jaíba-MG (COELHO FILHO *et al.*, 2006). O estudo avaliou a aplicação deficits hídricos de 15%, 30% e 45% em cada fase de desenvolvimento de frutos, e de *deficit* de 50% ao longo de todas as fases. As reduções das irrigações foram em relação a irrigação plena (ETc) e avaliados separadamente nas três fases de desenvolvimento de frutos. Nesse estudo também foram avaliadas as respostas do *deficit* regulado de irrigação (RDI) aplicados com gotejamento, duas linhas de gotejadores por planta e microaspersão, um emissor por planta.

As distintas configurações da irrigação localizada promoveram diferenças nas respostas alcançadas em função de interação manejo e sistema de irrigação no ambiente avaliado (Figura 4). A maior variabilidade de resposta ocorreu com as lâminas aplicadas na Fase I, principalmente com a microaspersão, indicando maior sensibilidade

principalmente nessa fase, sendo as respostas compatíveis às alcançadas com *deficit* fixo aplicado em todas as FASES (T50). Isso pode estar relacionado a heterogeneidade de distribuição de água no solo, nos dois anos de avaliação, em especial no segundo quando as condições de demanda atmosférica foram mais elevadas na Fase I, impactando mais severamente o abortamento floral e número de frutos colhidos. Maior estabilidade de produção entre os tratamentos e valores médios de produtividade foi observado nas plantas irrigadas por gotejamento.

No segundo ano de avaliação, é interessante observar que a produção nos tratamentos que receberam as maiores lâminas de água apresentou maior abortamento floral e de frutos (Figura 4b). Esta tendência também foi verificada para os tratamentos aplicados na Fase III. Esses resultados corroboram com outras observações que mostram ganhos em produção ao se utilizar *deficit* com RDI em comparação com ausência de estresse, devido ao maior número de frutos por planta, ou seja, menor abortamento de flores e frutos, que pode estar ligado a possível resposta a *deficit* na estação anterior ou *deficit* não programado (GASQUE *et al.*, 2016). Isto pode se relacionar com a possibilidade de efeito de memória genética do estresse anterior. Respostas epigenéticas a eventos de estresse induzindo fortes respostas bioquímicas e influenciadas por diferentes porta-enxertos de citros (NEVES *et al.*, 2018) podem explicar os resultados em campo. Esse certamente é um dos desafios para evolução do manejo de irrigação do futuro com maior entendimento das respostas biológicas às interações entre plantas, ambiente e manejo da irrigação deficitária.

Estudos realizados com laranja Pêra, sendo o porta-enxerto o limoeiro 'Cravo', na principal região produtora do Estado da Bahia, também evidenciaram a possibilidade de uso da irrigação com *deficit* controlado. Nesse estudo, Amorim *et al.* (2021) verificaram grandes impactos na produção quando os deficits foram aplicados nas Fases I e II, ao se suspender completamente a irrigação. Tanto a produtividade quanto aspectos qualitativos do fruto foram afetados quando a planta foi submetida ao estresse programado na Fase II.

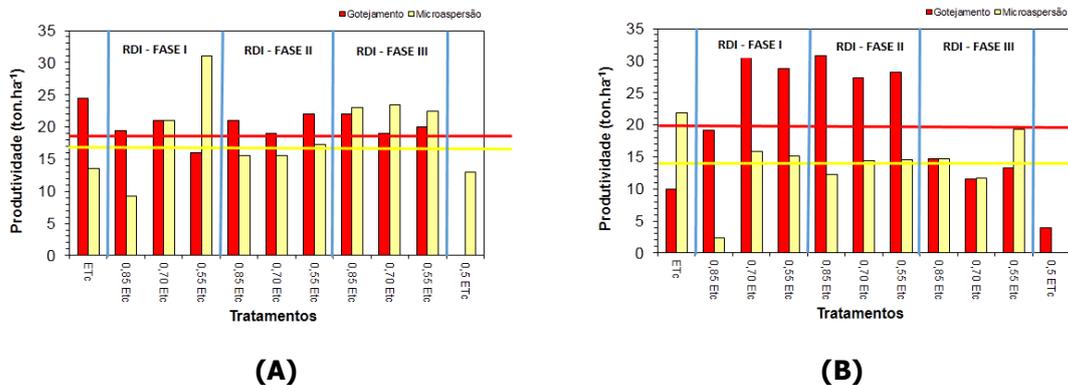


Figura 4. Produtividade de limeira ácida 'Tahiti' enxertada em limoeiro 'Cravo' nas condições semiáridas de Jaíba (MG), submetidas a diferentes níveis de irrigação com *deficit* controlado nas fases de desenvolvimento dos frutos (RDI): Fases I, II e III; e irrigado por microaspersão e gotejamento. (A) ano de 2005, e (B) ano de 2006 (COELHO FILHO *et al.*, 2006).

Com relação à qualidade de frutos, verificou-se manutenção de valores elevados de acidez, afetando a relação sólidos solúveis e acidez, que acabou sendo menor nas plantas sob maior *deficit* (RDI - Fase II e sequeiro). Esses resultados corroboram com diversos estudos de irrigação com *deficit* e mostram efeito na qualidade de frutos, efeito este dependente da intensidade do *deficit* aplicado e duração (BALLESTER *et al.*, 2011). Nos estudos de Amorim *et al.* (2021), os valores acidez dos frutos observados no RDI -

FASE II foram compatíveis ao tratamento sequeiro e estratégias de irrigação com *deficit* fixo, aplicando-se 50% água. Interessante pontuar que para os citros no semiárido ou regiões quentes ao longo do ano, há indução de baixa acidez dos frutos, e que o manejo de irrigação com *deficit* pode ser trabalhado estrategicamente para o aumento da qualidade do fruto, e atuar na qualidade.

A queda de produção observada no tratamento de RDI para laranjeiras cultivadas em clima subúmido, ligada a suspensão completa da irrigação na FASE II, foi pelo esgotamento completo da água disponível do solo na zona radicular da planta por longo período, similar às plantas não irrigadas, resultando em valores altos de temperatura foliar e de resistência estomática em período de elevado *deficit* de pressão de vapor da atmosfera. Tal fato resultou em produtividades similares ao tratamento sequeiro ao longo dos três anos de estudo ($73 \text{ kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e eficiência de uso de água de 8 kg m^{-3} . Estas produtividades foram inferiores ao verificado com plena irrigação ($110,4 \text{ kg planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e eficiência de uso de água ligeiramente superior, mas não estatisticamente ($7,37 \text{ kg m}^{-3}$). Mesmo em clima subúmido há necessidades de irrigação ao longo da Fase II, tendo como base índice que indique o limite superior de estresse.

O *deficit* fixo ao longo do ano é também pode ser adotada e nesse aspecto, resultados obtidos por Silveira *et al.* (2020) na principal região produtora de citros do Brasil, em experimento de longa duração, mostraram ser possível a aplicação de 50% da lâmina recomendada ao longo do período de produção sem efeitos significativos na produtividade das plantas, mantendo-se a qualidade de frutos sem diferenças grandes na eficiência de uso de água em comparação aos alcançados com as plantas que irrigadas sem *deficit*. Há que se ressaltar que na região sudeste, em especial no Estado de São Paulo e triângulo e sudoeste de Minas Gerais, há interesse em avaliar o efeito do *deficit* nas diferentes fases de desenvolvimento dos frutos pois esta época coincide, em geral, com o período de estiagens no qual a redução no uso da água é fundamental. A irrigação deficitária com aplicação de 75, 50 ou 25 % da ETc apresentaram produtividade e qualidade dos frutos de laranjeira Pêra-IAC compatíveis com a reposição de 100% da ETc em 3 dos 5 anos avaliados. Comparando-se às plantas não irrigadas a adoção de irrigações deficitárias aumentaram a produtividade e vários dos atributos qualitativos. Considerando os resultados relacionados à produção e qualidade dos frutos, o crescimento da copa ao longo do tempo, bem como a tendência ao longo do experimento e a eficiência do uso da água os autores recomendam a estratégia de irrigação deficitária de 50% da ETc. Interessante ressaltar que comparando a produtividade média dos tratamentos irrigados nos 5 anos de produção com o obtido em cultivo sob sequeiro, houve aumento de produtividade equivalente a 1,5 safras com a adoção da irrigação. Ainda há que se ressaltar que nos anos de baixa produtividade associada ao *deficit* hídrico há valorização da laranja com a redução da oferta, e, o aumento da receita deverá ser mais acentuado que o verificado na produtividade.

O efeito positivo do uso da irrigação deficitária em pomar de plantas adultas de laranjeira Valência no Estado de São Paulo foi verificado por Pavão (2016). A irrigação favoreceu a produtividade quando aplicada a lâmina de irrigação de 100, 75 e 50% da ETc em três anos de produção. A estratégia de aplicação de 50% da ETc apresentou também maiores valores de kg de sólidos solúveis por hectare, importante parâmetro para frutas destinadas à produção de suco. Assim a aplicação da irrigação com 50% de *deficit* mostrou-se interessante considerando-se economia no uso da água e produção.

Em condições semiáridas do Brasil, o *deficit* fixo está sendo aplicado com o objetivo de avaliar as interações de porta-enxertos em lima ácida 'Tahiti' e lâminas de água aplicadas para avaliar o manejo que proporcione aumento da eficiência de uso de

água e eficiência produtiva (kg de fruto m^{-3} de copa) em sistemas mais adensados de produção ($5 \times 2,5 \text{ m}$). Nessas condições, busca-se plantas mais compactas e produtivas, seja pelo uso de novos porta-enxertos que induzem o nanismo às copas, seja pela plasticidade induzida pelas interações entre porta-enxerto e lâminas aplicadas. Essa resposta é fundamental nas receitas do produtor, pois permite menores intervenções com podas e facilidade de colheita. Costa *et al.* (2019) e Jesus *et al.* (2019), trabalhando com gotejamento com irrigações diárias no semiárido de Bom Jesus da Lapa-BA, verificaram não haver interações copa e porta-enxerto de limeira ácida nos primeiros anos de cultivo. Mesmo assim, observaram efeitos dos porta-enxertos no vigor de plantas, expresso pelo volume de copa e respostas leves das lâminas aplicadas no volume de copa no terceiro ano de cultivo (Figura 5).

O volume de copa da lima ácida 'Tahiti' enxertada em híbrido TSKC x TRFD-06, Citrumelo Swingle e HTR-069 apresentaram valores similares estatisticamente e intermediários, comparados aos resultados obtidos com plantas enxertadas em limoeiro 'Cravo' e Flying Dragon, este com menor vigor. Os resultados encontrados impactam a eficiência produtiva das plantas (Figura 6), superiores para os porta-enxertos com copas mais compactas, como foi o caso do porta-enxerto *Flying Dragon* e seu híbrido com Tangerineira 'Sunki comum' (TSKC x TRFD - 06). O TSKC x TRFD-06 com eficiência produtiva de $2,82 \text{ kg m}^{-3}$, seguido do *Flying Dragon* que apresentou eficiência produtiva de $1,87 \text{ (kg m}^{-3})$, sendo superior ao limoeiro 'Cravo' e ao Citrumelo 'Swingle', porta-enxerto muito utilizados no cultivo da limeira ácida 'Tahiti'.

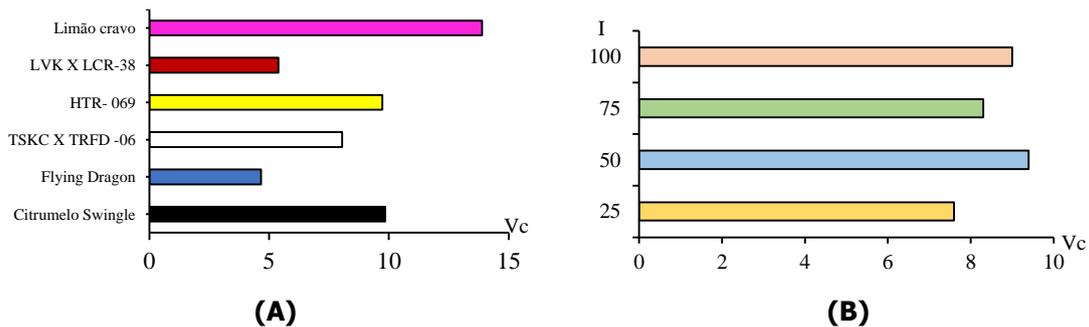


Figura 5. Volume de copa de plantas jovens de limeira ácida, enxertadas em 6 porta-enxertos: (1) Citrumelo *Swingle*, (2) *Flying Dragon*, (3) TSKC x TRFD-06, (4) HTR-069, (5) LVK x LCR-038 e (6) Limoeiro 'Cravo' (A), e plantas submetidos (volume de copa – V_c , m^3) a 4 níveis de lâminas de irrigação (I, %) ao longo do ciclo em pomar irrigado por gotejamento e frequência diária (B). Bom Jesus da Lapa (BA). Ano de 2019.

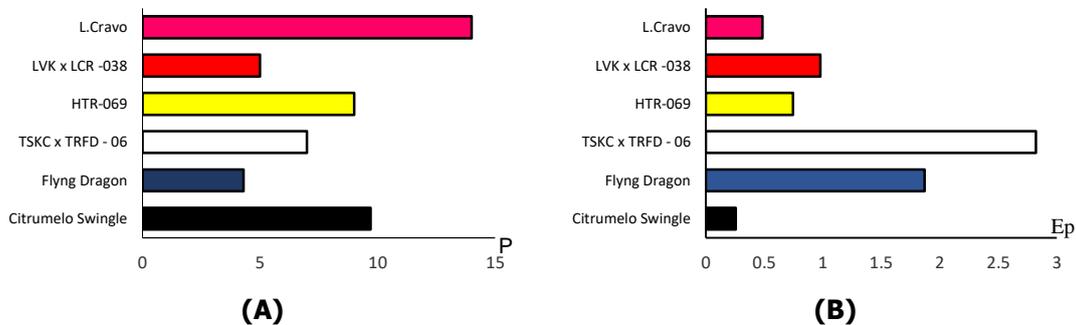


Figura 6. Produtividade (P , kg planta^{-1}) (A) e eficiência produtiva (E_p , kg m^{-3}) (B) de pomar jovem de limeira ácida 'Tahiti', em plantas enxertadas em 6 porta-enxertos e submetidos a 4 níveis de irrigação ao longo do ciclo em pomar irrigado por gotejamento com frequência diária. Bom Jesus da Lapa, BA. Ano 2019.

22.2.3.8 Irrigação com secamento parcial e alternado do sistema radicular das plantas

Nesse tipo de manejo, as plantas são irrigadas apenas com fração da água recomendada, geralmente 50%, alternando-se a zona irrigada do solo em períodos que variam em função da sensibilidade da planta ao *deficit*, distribuição radicular e demanda atmosférica e capacidade de armazenamento de água no solo. O método se baseia na sinalização química de ácido abscísico (ABA) produzido no sistema radicular da planta submetido ao *deficit* que translocado para copas, que afeta a abertura de estômatos e crescimento das plantas. Assim, o controle da produção de ABA com a prática do PRD tem como objetivos direcionar os fluxos de crescimento da planta e aumento da eficiência do uso de água, desde que o fechamento dos estômatos, controlados pelos teores de ABA seja apenas parcial permitindo a conservação da água na planta, efeitos leves nas taxas fotossintéticas (KANG; ZHANG, 2004), aumento da eficiência de uso de água (A/E) e a manutenção do status hídrico da planta. Para tal propósito é necessário irrigar alternadamente/heterogeneamente em zonas do solo com sistema radicular umedecido pela irrigação, permitindo a manutenção vital da planta e seu status hídrico; e outra parte do sistema radicular, na zona seca do solo, seja responsável pela sinalização de ABA afetando as trocas gasosas com consequências diretas no fechamento de estômatos, redução do crescimento foliar e aumento da eficiência de uso de água. Em outras palavras, é possível separar as respostas bioquímicas do estresse hídrico dos efeitos hidráulicos do estresse da redução da disponibilidade de água (LOVEYS *et al.*, 2000).

Inicialmente, visando o controle do vigor de ramos de videiras e melhor balanço com fluxos reprodutivos, pensou-se que o efeito do secamento parcial fosse duradouro (DRY; LOVEYS, 1998), mas foi observado que é transiente e algum tempo após o início do estresse, as plantas reduzem a produção de ABA, com taxas de crescimento e condutância estomática retornando aos níveis das condições pré-estresse. A alternativa para este fato que dificultava o uso dessa estratégia surgiu com a alternância regular do secamento nas zonas irrigadas (DRY *et al.*, 1999) e a possibilidade de manutenção da produção de ABA em níveis elevados, sempre se mantendo nível de transporte de água nas raízes expostas ao *deficit* para garantir sinalização para os ramos (DODD *et al.*, 2008). Essa é a base do manejo PRD que depois foi estudado em diversas culturas, dentre estas para os citros (HUTTON; LOVEYS, 2011; CONSOLI *et al.*, 2014; PÉREZ-PÉREZ *et al.*, 2018).

O manejo com PRD também foi estudado com a cultura dos citros no Brasil. Em clima semiárido e solo arenoso, Jaíba-MG, pomar adulto de limeira ácida 'Tahiti' enxertada em limoeiro 'Cravo' irrigada por gotejamento foi submetido a diferentes tratamentos envolvendo o manejo de irrigação PRD envolvendo reduções de 25 a 50% da ETC e alternâncias de secamento/molhamento do solo de 7, 14, 21 e 28 dias. Foi verificada a possibilidade de economia de 50% da irrigação, com ganhos em eficiência de uso de água e produtividade em relação a plantas irrigadas sem estresse (Figura 7). As frequências de alternâncias de molhamento do solo devem ser avaliadas e aplicadas com critério em pomares irrigados por PDR. Neste estudo foi verificado que mais importante que o volume irrigado são as frequências de alternâncias das zonas molhadas. Baixas frequências resultaram em quedas de produção e eficiência de uso de água, como pode ser verificado para frequências de 14, 21 e 28 dias, resultando em produtividades inferiores à plena irrigação (100 ETC): redução de 36% irrigando com 50% lâmina recomendada e de 27% ao se irrigar com 85% da lâmina recomendada. Por outro lado, frequências alternadas de irrigação de 7 dias viabilizaram produtividades e EUA superiores à irrigação plena, independente da lâmina aplicada (Figura 7).

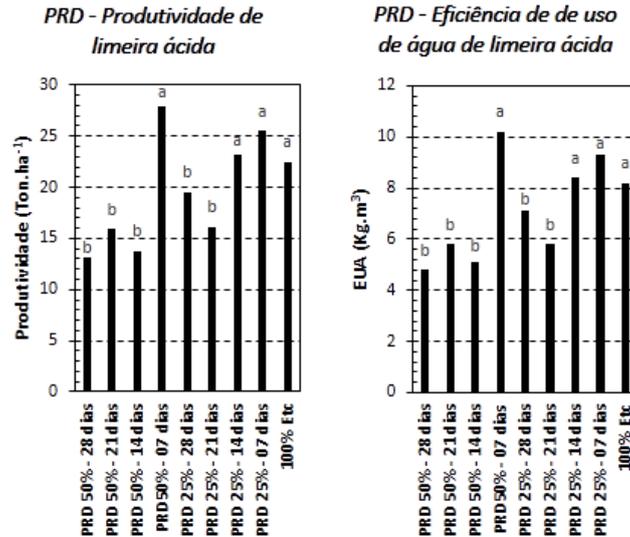


Figura 7. Produtividade ($t\ ha^{-1}$) e eficiência de uso de água ($kg\ m^{-3}$) de limeira ácida 'Tahiti' enxertado em limoeiro 'Cravo' em condições semiáridas, Jaíba (MG) (COELHO *et al.*, 2012).

Sampaio *et al.* (2012) em pomar irrigado por microaspersão e tratamentos de PRD aplicados continuamente por dois anos, em solo arenoso e com impedimento físico a aproximadamente 1 m de profundidade, não verificaram benefícios do PRD em relação ao *deficit* fixo de 50% ETC, apesar dos ganhos nesses dois tratamentos em relação a eficiência de uso de água ($9,4\ kg\ m^{-3}$), comparado aos alcançados no manejo sem *deficit* ($6,30\ kg\ m^{-3}$). Foi comprovada a possibilidade de aplicação de lâmina de 75% da ETC (PRD - 21 dias) para garantias de produtividades compatíveis com a irrigação plena ($22,5\ t\ ha^{-1}$), com ganhos expressivos em EUA ($8,16\ kg\ m^{-3}$). Nesse estudo ficou comprovada a importância do monitoramento do potencial da água da planta e temperatura foliar na estratégia da irrigação por PDR, que refletiram o maior controle estomático (Figura 8).

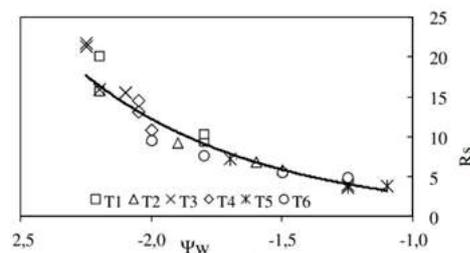


Figura 8. Relação entre potencial hídrico dos ramos (Ψ_w , MPa) e resistência estomática (R_s , $s\ cm^{-1}$) de folhas em pomar de lima ácida 'Tahiti', fazenda Boa Vista, Iaçú, BA. (T₁) PRD 7 dias e 50% da ETC, (T₂) PRD 14 dias e 50% da ETC, (T₃) PRD 21 dias e 50% da ETC, (T₄) Irrigação fixa e 50% ETC, (T₅) irrigação fixa e 100% da ETC, e (T₆) PRD 21 dias 75% da ETC (SAMPAIO *et al.*, 2014)

Plantas cítricas são muito responsivas ao aumento do *deficit* de pressão de vapor e temperatura do ar, geralmente elevados nos meses secos no semiárido, regulando a abertura estomática e aumentando a temperatura foliar, principalmente em condições de PRD (LOVEYS *et al.*, 2004). Essas respostas ainda foram mais significativas em plantas em PRD submetidas a alternâncias de irrigação de 7 dias, com reflexos no balanço total de água na planta expresso pelo fluxo de seiva, mas que não implicaram em ganhos produtivos. Levando em consideração o tratamento PRD com redução de 25% da lâmina alternada a cada 21 dias, os valores de potenciais ficaram em $-1,6\ MPa$

em média, não superando - 2 MPa, o que parece ser um limite para o manejo de irrigação com *deficit*. Valores médios de potencial da água na folha para os tratamentos PRD ficaram entre -1,6 e -2,2 MPa e -1,2 MPa para irrigação plena. Faixas geralmente encontradas em trabalhos com *deficit* de irrigação, como verificado anteriormente. As quedas de produção ao se reduzir 50% da lâmina podem ser explicadas pela maior variabilidade de lâmina aplicada no solo, pelo sistema de microaspersão, ponto a ser melhor estudado; agravado pelo solo com baixa capacidade de armazenamento e pouco profundo.

Certamente o conhecimento dos níveis ótimos de secamento do solo para promover a sinalização química, alterações nas relações hídricas foliares, status hídrico da planta e alocação de biomassa, influenciados pelas frequências de alternâncias e consequente proporções da massa radicular exposta ao solo seco, é ponto chave a ser investigado para o sucesso da técnica do PRD (PÉREZ-PÉREZ *et al.*, 2018).

Evidências da importância de se estabelecer os períodos de alternâncias de irrigação PRD com critérios científicos foram observados por Amorim *et al.* (2021), em estudos realizados em condições subúmidas do litoral Norte da Bahia, com laranjeira 'Pêra'. Existiu uma boa relação entre produtividades das plantas e períodos de alternâncias estudados (15 e 30 dias). Plantas submetidas a alternâncias de 15 dias foram mais produtivas, mesmo assim 10% a menos que o tratamento sem *deficit*, e permitindo acréscimos de 56% na eficiência de uso de água, 12,21 kg m⁻³ em relação a irrigação plena, 7,7 kg m⁻³. Interessante que a queda de produção em relação a irrigação plena foi de 24% para o tratamento com alternâncias a cada 30 dias e com eficiência de uso de água de 11,1 kg m⁻³. Esses resultados sugerem que os ganhos poderiam ser melhores com o uso do PRD com alternâncias menores aos estudados.

22.3 Viticultura

22.3.1 Região

A irrigação de videiras no Brasil tem sido adotada, principalmente, nas regiões tropicais do país, como no semiárido nordestino, no norte de Minas Gerais ou na região noroeste de São Paulo, onde todas as áreas vitícolas são irrigadas. Nas regiões de clima temperado ou subtropical do Brasil, como nos estados do Sul, na região sudeste de São Paulo e no sul de Minas, a irrigação, em geral, não é adotada, embora haja um crescente interesse para a implantação de sistemas irrigados nessas áreas, em função da ocorrência mais frequente de estiagens durante os períodos de desenvolvimento da cultura. Nessas regiões de clima temperado ou subtropical, a produção de uvas de mesa é mais favorecida pelo uso da irrigação, uma vez que critérios como produtividade e tamanho de cachos e bagas apresentam vantagens competitivas no mercado. Além disso, as uvas de mesa apresentam, normalmente, preço maior por kg, em relação às uvas para processamento. No entanto, em algumas áreas do sul do país tem havido interesse na irrigação de vinhedos destinado à produção de uvas para vinho, visando melhor formação das plantas e evitando a ocorrência de deficits hídricos mais severos, o que poderia comprometer a qualidade final dos produtos. Também há interesse, nessas regiões, pela irrigação em áreas que utilizam cobertura plástica impermeável, empregada para proteger os vinhedos das precipitações pluviais, que favorecem a incidência de doenças fúngicas. Embora a cobertura reduza, normalmente, a demanda hídrica da cultura, ela impede, muitas vezes, o umedecimento adequado do sistema radicular das plantas.

22.3.2 Métodos de irrigação

Os métodos mais empregados na irrigação da cultura são a microaspersão e o gotejamento, que apresentam, normalmente, alta uniformidade de aplicação e evitam o molhamento foliar, reduzindo o risco de ocorrência de doenças fúngicas, como o míldio (*Plasmopara viticola*) e as podridões de cachos (*Glomerella cingulata*, *Botrytinia fuckeliana*). Na microaspersão, os emissores são, normalmente, fixados no aramado do parreiral, operando de modo invertido e umedecendo toda a área cultivada, inclusive as entrelinhas. Uma das vantagens desse método, em relação ao gotejamento, é a sua menor suscetibilidade ao entupimento, inclusive em decorrência de águas com alta concentração de ferro, reduzindo a necessidade de investimento em sistemas de filtragem mais onerosos. Ele também possibilita melhor aplicação e incorporação da matéria orgânica ao solo, prática bastante comum em algumas regiões produtoras de uvas. Por outro lado, o consumo de água costuma ser maior, em relação ao gotejamento, em função da maior área molhada pelos microaspersores e, conseqüentemente, das maiores perdas por evaporação da água do solo (TEIXEIRA *et al.*, 2007). A irrigação por gotejamento permite, por sua vez, o manejo com molhamento parcial do sistema radicular, prática que tem sido empregada em algumas áreas, principalmente em regiões semiáridas. Além disso, no gotejamento, as práticas culturais (poda, condução de ramos, etc.) não precisam ser interrompidas durante a aplicação de água, o que não ocorre na microaspersão.

22.3.3 Necessidades hídricas da videira

As necessidades hídricas do vinhedo irão depender das condições meteorológicas do local e de fatores específicos relacionados à cultura. A demanda será maior quanto maiores forem a radiação solar (R_s), a temperatura do ar (T) e a velocidade do vento (V_v) e quanto menor for a umidade relativa do ar (UR). Em relação à cultura, diferentes fatores irão afetar a necessidade hídrica, como o sistema de condução do parreiral, o desenvolvimento vegetativo das plantas, o uso de cobertura plástica, o manejo da irrigação e a cobertura vegetal do solo, entre outros.

A presença de cobertura vegetal sobre o solo poderá afetar a demanda hídrica ou evapotranspiração do vinhedo, principalmente no período após a poda, quando ainda é restrita a área foliar das videiras (CONCEIÇÃO *et al.*, 2012). Quanto menor for o intervalo entre irrigações, maiores serão as perdas por evaporação da água do solo. O uso de cobertura plástica sobre o parreiral tende, por sua vez, a diminuir a demanda hídrica do vinhedo em função, principalmente, da redução da radiação solar incidente e da velocidade do vento (HOLCMAN *et al.*, 2018). Já a evapotranspiração da cultura (ETc) tende a aumentar com o desenvolvimento vegetativo das plantas, apresentando redução no final do ciclo, principalmente em regiões que apresentam senescência das folhas. Por fim, a influência do sistema de condução do parreiral está relacionada à área foliar interceptada pela radiação solar, ou a fração de cobertura ou porcentagem da área sombreada pelo dossel (PAS). Isso porque a ETc tende a apresentar valores maiores para plantas que com maior PAS, mesmo que apresentem mesmo índice de área foliar (WILLIAMS; AYARS, 2005). Dessa forma, vinhedos com sistemas de condução horizontal do tipo latada apresentam, normalmente, maior demanda hídrica do que aqueles que adotam sistemas de condução vertical do tipo espaldeira (Figura 9).



Figura 9. Videiras conduzidas no sistema latada (A) e no sistema espaldeira (B). Fotos: Marco A. F. Conceição.

22.3.4 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação em vinhedos tem sido realizado, normalmente, com base na estimativa da demanda hídrica ou evapotranspiração diária da cultura (ET_c). A estimativa da ET_c é feita, geralmente, multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente de cultivo (K_c). A ET_o representa a demanda hídrica da atmosfera, sendo função das variáveis meteorológicas registradas no local. Quando todas as variáveis estão disponíveis, pode-se calcular a ET_o pelo método padrão de Penman-Monteith. No entanto, quando só estiverem disponíveis dados de temperaturas máxima e mínima do ar, a ET_o poderá ser estimada pelo método de Hargreaves, que foi ajustado para algumas regiões vitícolas do país (CONCEIÇÃO, 2017).

Já os valores do K_c são, muitas vezes, obtidos experimentalmente em diferentes condições de clima, solo e práticas culturais. Teixeira *et al.* (1999) obtiveram valores de K_c entre 0,65 e 1,15, para videiras para mesa do cultivar Itália (*Vitis vinifera*), em Petrolina (PE). Na mesma localidade, Nascimento (2010) obteve valores de K_c entre 0,31 e 1,17, para videiras para vinho do cultivar Syrah (*Vitis vinifera*). Já para as condições do noroeste paulista, Conceição *et al.* (2012) obtiveram valores de K_c entre 0,23 e 0,93, para videiras para mesa do cultivar Niágara Rosada (*Vitis labrusca*), cobertas com tela plástica de 18% de sombreamento. Essa tela é utilizada, na região, para proteção dos frutos contra o ataque de pássaros e morcegos.

Modelos matemáticos também podem ser empregados para a estimativa de K_c em função dos diversos fatores que afetam seu valor (CONCEIÇÃO, 2016b), entre eles a porcentagem da área sombreada (PAS) pelo dossel. Williams e Fidelibus (2016), com base em dados obtidos na Califórnia empregando-se lisímetro de pesagem, obtiveram a relação entre PAS e K_c expressa na equação 2. Os autores registraram um valor máximo da PAS igual a 82%, correspondendo a um valor máximo de K_c igual a 1,40. Modelos como esse, no entanto, necessitam ainda ser ajustados para as condições brasileiras.

$$K_c = 0,017 \cdot PAS \quad (1)$$

A determinação da PAS pode ser efetuada por meio de imagens digitalizadas, ou empregando-se equipamentos específicos, que podem ser simples ou mais sofisticados (Figura 10).

Uma vez obtidos os valores da ET_c, pode-se efetuar o balanço hídrico no vinhedo, incluindo-se os dados da precipitação pluvial diária e da taxa de aplicação de água do sistema de irrigação. Deve-se considerar que em áreas com um manejo adequado do solo o escoamento superficial é desprezível, e que o plantio de videiras

deve ser realizado em locais onde não haja ascensão capilar. Para facilitar o cálculo diário do balanço hídrico, podem ser utilizados aplicativos ou planilhas eletrônicas (CONCEIÇÃO, 2017). Para avaliar se os critérios adotados estão adequados, deve-se realizar o monitoramento hídrico do solo e, ou, das plantas.



Figura 10. Equipamentos para estimativa da porcentagem de área sombreada pelo dossel das videiras. Fotos: Marco A. F. Conceição.

22.3.5 Monitoramento hídrico do solo e da planta

O monitoramento hídrico do solo pode ser realizado empregando-se sensores de umidade ou de tensão da água no solo. Para a determinação da tensão podem ser utilizados tensiômetros, ou sensores do tipo Irrigás[®], que foram desenvolvidos pela Embrapa Hortaliças para irrigação de olerícolas, mas que têm sido utilizados, também, em outras culturas, inclusive em videiras (CONCEIÇÃO, 2016c). Os sensores, em geral, devem ser instalados na região central do sistema radicular, para avaliar as condições hídricas das plantas; e abaixo das raízes, para avaliar se estão ocorrendo perdas por percolação. Apesar das videiras apresentarem, muitas vezes, raízes profundas, a maior parte do sistema radicular da cultura se concentra até 0,60 m de profundidade, sendo essa a camada que deve ser monitorada (PIRES *et al.*, 1997; BASSOI *et al.*, 2002; BASSOI *et al.*, 2003).

Para cultivares de uvas de mesa, pode-se admitir uma redução de até 35% da água disponível no solo, enquanto para cultivares de uvas para vinho, esse valor pode chegar a 45% (ALLEN *et al.*, 2006). Os limites de tensão da água no solo para a produção de uvas de mesa devem ficar entre 10 kPa e 30 kPa, até o final da formação das bagas; e de 30 kPa a 80 kPa, no período de maturação e após a colheita (CONCEIÇÃO, 2016a), sendo que os valores mais baixos devem ser utilizados em solos de menor capacidade de retenção de água. Esses limites também podem ser empregados em cultivares de uvas destinadas à elaboração de sucos e vinhos de mesa, uma vez que para esses cultivares, assim como para as uvas de mesa, também são desejadas altas produtividades, com vistas a um maior retorno econômico do vinhedo. Já para uvas destinadas à elaboração de vinhos finos, os valores limites da tensão poderão ser maiores, já que o uso de *deficit* hídrico controlado pode melhorar a qualidade e o preço final dos vinhos, embora reduza, muitas vezes, o rendimento da cultura (OJEDA, 2007).

Para o monitoramento hídrico das plantas é comum o uso da câmera de Scholander, que possibilita a determinação do potencial hídrico foliar (ψ_f). Podem ser

recomendados os seguintes valores de ψ_f para a cultura da videira, determinados antes do amanhecer (DELOIRE *et al.*, 2006; OJEDA, 2007): (i) $\psi_f \geq -0,2$ MPa, estresse hídrico ausente ou moderado, (ii) $-0,2 \text{ Mpa} > \psi_f \geq -0,4$ MPa, estresse leve a moderado, (iii) $-0,4 \text{ Mpa} > \psi_f \geq -0,6$ MPa, estresse moderado a severo, e (iv) $-0,6 \text{ MPa} > \psi_f$, estresse severo.

De acordo com Ojeda (2007), para vinhedos em formação e para a produção de uvas de mesa, ou destinadas à elaboração de sucos e vinhos de mesa, o estresse hídrico deve ser ausente ou moderado: (i) para a obtenção de vinhos finos jovens, leves e frutados pode-se admitir um estresse leve a moderado durante a maturação dos frutos, (ii) já para vinhos de guarda, admite-se um estresse leve a moderado durante o desenvolvimento das bagas, (iii) e um estresse moderado a severo durante a maturação, e (iv) esses valores servem como uma primeira referência, uma vez que devem ser realizadas pesquisas para cada local e cultivar a fim de se estabelecer os limites mais adequados em cada condição.

22.3.6 Manejo da irrigação com *deficit* hídrico e secamento parcial do sistema radicular

O uso do manejo da irrigação com *deficit* hídrico controlado (RDI, da sigla em inglês) é mais comum em uvas para processamento, principalmente naquelas destinadas à elaboração de vinhos finos, visando ao incremento da qualidade e do preço dos produtos finais. Isso porque o *deficit* hídrico favorece a concentração de açúcares e a redução da acidez nos frutos (BASSOI *et al.*, 2011), levando à obtenção de vinhos com maior concentração alcoólica, melhores intensidades de cor e aroma, melhor estrutura, harmonia e persistência (COSTA, 2009). Além disso, permite economia de água (BASSOI *et al.*, 2015), recurso escasso, principalmente nas regiões semiáridas do Brasil.

Essa estratégia também pode, no entanto, ser adotada em cultivares de uvas de mesa com o objetivo, principalmente, de reduzir uso da água, sem alterar a produtividade ou a qualidade final dos frutos (PERMANHANI *et al.*, 2016). Nesses cultivares, o *deficit* hídrico moderado pode ser adotado durante todo o ciclo produtivo da cultura (ANDRADE *et al.*, 2017), ou suspendendo-se a irrigação no período de maturação dos frutos (BASSOI *et al.*, 1999; MARINHO *et al.*, 2009; ZEOLI *et al.*, 2011; CONCEIÇÃO *et al.*, 2014).

O manejo com secamento parcial do sistema radicular (PRD, da sigla em inglês) visa umedecer parcialmente a região das raízes de forma alternada, levando as plantas à redução da transpiração, em função do fechamento parcial dos estômatos. Essa prática, contudo, pode, muitas vezes, afetar o tamanho dos cachos e o rendimento da cultura (BASSOI, 2011). Novos estudos necessitam ser empreendidos com a utilização dessa técnica, principalmente na região semiárida, uma vez que ela pode reduzir o consumo hídrico da cultura, aumentando a eficiência do uso da água no vinhedo (BASSOI *et al.*, 2005).

22.4 Considerações finais

A irrigação das videiras é imprescindível nas regiões tropicais do Brasil. O incremento do seu uso está, assim, relacionado à expansão da própria viticultura nessas regiões. O lançamento de novos cultivares, mais adaptadas às condições brasileiras, tem contribuído de maneira expressiva para essa expansão. Já em regiões de clima temperado ou subtropical, a irrigação deverá ser cada vez mais demandada em função

das estiagens que deverão ocorrer com maior frequência, como consequência das mudanças climáticas globais.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, Riego y Drenaje, 56, 298p., 2006.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, n.56, 300p. Roma: FAO, 1998.

ALVES JÚNIOR, J. **Necessidade hídrica e resposta da cultura de lima ácida "Tahiti" a diferentes níveis de irrigação**. 100p., 2006. Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, 2006.

ALVES JUNIOR, J.A.; BANDARANAYAKE, W.; PARSONS, L.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Citrus root distribution under water stress grown in sandy soil of central Florida. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.6, p.1109-115, nov./dez., 2012.

AMORIM, M.S.; TOYOSUMI, I.S.; AMORIM, W.S.; CAMILLO, L.S.R.; FERREIRA, L.N.; ROCHA JUNIOR, D.S.; SOARES FILHO, W.S.; GESTEIRA, A.S.; COSTA, M.G.C.; COELHO FILHO, M.A. Partial rootzone drying and regulated deficit irrigation can be used as water-saving strategies without compromising fruit yield and quality in tropically grown sweet orange. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v.98, n.2, p.1-10, 2021.

ANDRADE, V.P.M.; SILVA, J.A.B.; SOUSA, J.S.C.; OLIVEIRA, F.F.; SIMÕES, W.L. Physiological characteristics of grapevine under irrigation and fertilization management. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.4, p.390-398, 2017.

BALLESTER, C.; CASTEL, J.; INTRIGLIOLO, D.; CASTEL, J. Response of Clementina de Nules citrus trees to summer deficit irrigation. Yield components and fruit composition. **Agricultural Water Management**, 98.6, p.1027-1032, 2011.

BARBERA, G.; FATTA DEL BOSCO, G.; LO CASCIO, B. Effects of water stress on lemon summer bloom: The "forzatura" technique in the Sicilian citrus industry. **Acta Horticulturae**, v.171, p.391-397, 1985.

BARRETO, G.B.; RODRIGUEZ, O.; REIS, A.J.; ARRUDA, F.B. **Irrigação de citros**. Campinas: Instituto Agrônomo, 17p., 1976. (Boletim Técnico, 35).

BASSANEZI, R.B.; FERNANDES, N.G.; MASSARI, C.A. Progresso da morte súbita dos citros no Estado de São Paulo no período 2002-2005. **Laranja**, v.27, n.1, p.13-29, 2006.

BASSANEZI, R.B.; LOPES, S. A.; MIRANDA, M.P.; WULFF, N.A.; VOLPE, H.X.L.; AYRES, A.J. Overview of citrus huanglongbing spread and management strategies in Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v.45, p.251-264, 2020.

BASSOI, L.H. Irrigation management on wine grapes in the Tropical zone. **Acta Horticulturae**, v.910, p.83-88, 2011.

BASSOI, L.H.; ASSIS, J.S.; LIMA FILHO, J.M.P.; RIBEIRO, H.A.; SILVA, M.R.; MIRANDA, A.A. Interrupção da irrigação no período de maturação da uva cv. Itália. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 5p., 1999. (Embrapa Semiárido. Comunicado Técnico, 79).

BASSOI, L.H.; CORREIA, J.S.; SANTOS, A.R.L.; SILVA, J.A.; COSTA, B.R.S. Deficit irrigation in grapevine e cv. Syrah during two growing seasons in the Brazilian semiarid. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.3, p.430-441, 2015.

BASSOI, L.H.; DANTAS, B.F.; LIMA FILHO, J.M.P.; LIMA, M.A.C.; LEÃO, P.C.S.; SILVA, D.J.; MAIA, J.L.T.; SOUZA, C.R.; SILVA, J.A.M.; RAMOS, M.M. Preliminary results of a long-term

- experiment about RDI and PRD irrigation strategies in wine grapes in São Francisco Valley, Brazil. **Acta Horticulturae**, v.754, p.275-282, 2007.
- BASSOI, L.H.; GONÇALVES, S.O.; SANTOS, A.R.L.; SILVA, J.A.; LIMA, A.C.M. Influência de manejos de irrigação sobre aspectos de ecofisiologia e de produção da videira cv. Syrah / Paulsen 1103. **Irriga**, v.16, n.4, p.395-402, 2011.
- BASSOI, L.H.; GRANGEIRO, L.C.; SILVA, J.A.M.; SILVA, E.E.G. Root distribution of irrigated grapevine root stocks in a coarse texture soil of the São Francisco valley, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.1, p.35-38, 2002.
- BASSOI, L.H.; HOPMANS, J.W.; JORGE, L.A.C.; ALENCAR, C.M.; SILVA, J.A.M. Grapevine root distribution in drip and microsprinkler irrigation. **Scientia Agricola**, v.60, n.2, p.377-387, 2003.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV, 2006. 611p.
- BOMAN, B.; PARSONS, L. Evapotranspiration. In: BOMAN, B.J. **Water and Florida Citrus**. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, p.163-174, 2002.
- BOMAN, B.; PARSONS, L.; OBREZA, T.; STOVER, E. Citrus water use and irrigation scheduling. In: BOMAN, B.J. **Water and Florida Citrus**. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, p.175-191, 2002.
- BOMAN, B.; SYVERTSEN, J.P. Drainage lysimeters for high water table citrus studies. In: ALLEN, R.G. (Ed.). **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, p.318-325, 1991.
- BRITO, R.R.; FILGUEIRAS, R.; SANTOS, J.E.V.; LEDA, V.C.; ANDRDRADE JUNIOR, A.S.; ZIMBACK, R.C. Índices de vegetação SAVI, NDVI e temperatura de brilho na caracterização da cobertura vegetativa do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, João Pessoa-PB, **Anais**, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.
- CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of citrus (*Citrus spp.*): a review. **Experimental Agriculture**, v.48, n.3, p.347-377, 2012.
- CASTEL, J.R. Evapotranspiration of drip irrigated Clementine citrus tree in a weighing lysimeter. In: CHARTOZULAKIS, K.S. PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRRIGATION AND HORTICULTURAL CROPS, v.1, p.91-98, 1996.
- COELHO FILHO, M.A. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan) e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 91p., 2002. 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; SIMÕES, W.L.; COSTA, E.L. Uso regulado do *deficit* de irrigação nas fases de crescimento de frutos de lima ácida Tahiti irrigado por gotejamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16, 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABID. CD ROM, 2006.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; MAGALHÃES, A.D.J.; OLIVEIRA, A.S. In: SOUSA, V.F.; MAROUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, cap.14, p.413-439, 2011.
- COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A.; SIMÕES, W.L.; COELHO, Y.S. Irrigação em citros nas condições do nordeste do Brasil. **Laranja**, v.27, n.2, p.297-320, 2006.
- COELHO, E.F.; COELHO, Y.S.; SANTOS, M.R. Produtividade da laranja 'Pêra' sob diferentes níveis de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13, 2003, Juazeiro. **Anais...** CD-ROM. Juazeiro: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2003.

COELHO, E.F.; OLIVEIRA, F.C.; ARAÚJO, E.C.E.; VASCONCELOS, L.F.L. Sistema radicular da laranja 'pêra' não-irrigada e irrigada por gotejamento em solo arenoso dos tabuleiros costeiros. **Magistra**, Cruz das Almas, v.15, n.1, p.45-53, 2003.

CONCEIÇÃO, M.A.F. **IRRIVITIS-T: manual da planilha eletrônica para manejo da irrigação de videiras com base na temperatura do ar**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 8p., 2017. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 198).

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Limites de tensão da água no solo para a produção de uvas de mesa**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 22p., 2016a. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 198).

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Modelos para estimativa dos coeficientes de cultivo (Kc) de videiras irrigadas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 13p., 2016b (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 132).

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Uso de sensores Irrigas® para o manejo da água na produção de uvas de mesa no noroeste paulista**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2016c. 6p. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 183).

CONCEIÇÃO, M.A.F.; SAVINI, T.C.; SOUZA, R.T.; SANTOS, C.P. Suspensão da irrigação durante a maturação de uvas 'Niágara Rosada'. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2. 2014, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI: INCTSA: INI, 2014. p.2896-2901.

CONCEIÇÃO, M.A.F.; SOUZA, R.T.; ZEOLI, J.J.S.; PAULA, M.V.B. Coeficiente de cultura (Kc) para videira com e sem cobertura vegetal no solo. **Irriga**, Edição Especial, p.234-249, 2012.

CONESA, M.R.; LA ROSA, J.M.; FERNÁNDEZ-TRUJILLO, J.P.; DOMINGO, R.; PÉREZ-PASTOR, A. Deficit irrigation in commercial mandarin trees: water relations, yield and quality responses at harvest and after cold storage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, n.16, v.3, 1201, 15p., 2018.

CONSOLI, S.; STAGNO, F.; ROCCUZZO, G.; CIRELLI, G.L.; INTRIGLIOLO, F. Sustainable management of limited water resources in a young orange orchard. **Agricultural Water Management**, v.132, p.60-68, 2014.

COSTA, A.L.C. **Manejo da irrigação com restrição hídrica sobre a fisiologia, produção e qualidade da uva e do vinho da cultivar *Chenin Blanc* no Vale do São Francisco**. 70p., 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

COSTA, J.; SANTOS, G.G.; JESUS, J. F.; SAMPAIO, A.; COELHO FILHO, M.A. Crescimento de lima ácida 'Tahiti' em diferentes porta-enxertos e manejo de irrigação em clima semiárido. In: Embrapa Mandioca e Fruticultura. Anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26, 2019, Juazeiro, BA/Petrolina, PE. Fruticultura de precisão: desafios e oportunidades. **Anais**. Petrolina: Embrapa Semiárido: UNIVASF: SBF, 2019.

DELOIRE, A.; CARBONNEAU, A.; WANG, Z.; OJEDA, H. Vid y agua: una breve revisión. **Enología**, v.5, p.36-42, 2006.

DODD, I.C.; EGEE, G.; DAVIES, W.J. ABA signaling when soil moisture is heterogeneous: decreased photoperiod sap flow from drying roots limit ABA export to the shoot. **Plant Cell Environ**, v.31, p.1263-1274, 2008.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO. **Irrigation and drainage paper**, 33, 179p., 1979.

DRY, P.R.; LOVEYS, B.R. Factors influencing grapevine vigor and the potential for control with partial rootzone drying. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, n.4, v.3, p.140-148, 1998.

DRY, P.R.; STOLL, M., Mc CARTHY, M.G.; LOVEYS, B.R. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. In: III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRRIGATION OF HORTICULTURAL CROPS, n.537, p.187-197, 1999.

- DZIKITI, S.; VERREYNNE, J.S.; STUCKENS, J.; STREVER, A.; VERSTRAETEN, W.W.; SWENNEN, R.; COPPIN, P. Determining the water status of Satsuma mandarin trees (*Citrus unshiu Marcovitch*) using spectral indices and by combining hyperspectral and physiological data. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.150, p.369-379, 2010.
- DZIKITI, S.; VERREYNNE, J.S.; STUCKENS, J.; STREVER, A.; VERSTRAETEN, W.W.; SWENNEN, R.; THARON, K.I.; COPPIN, P. Seasonal variation in canopy reflectance and its application to determine the water status and water use by citrus trees in the Western Cape, South Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.151, p.1035-1044, 2011.
- FUNDO DE DEFESA DA CITRICULTURA. Fundecitrus. Inventário de árvores do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro: retrato dos pomares em março de 2020. Araraquara, SP: **Fundecitrus**, 105p., 2020. Disponível em: https://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/2020_06_25_Invent%C3%A1rio_e_Estimativa_do_Cinturao_Citricola_2020-2021.pdf. Acesso em: 16 mar. 2021.
- GARCIA PETILLO, M.; CASTEL, J.R. Water balance and crop coefficient estimation of a citrus orchard in Uruguay. **Spanish Journal of Agricultural Research**, n.5, v.2, p.232-243, 2007.
- GARCÍA-TEJERO, I.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J.A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, n.38, p.106-117, 2011.
- GARCÍA-TEJERO, I.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J.A.; MARTÍNEZ, G.; ROMERO, R.; DURÁN-ZUAZO, V.H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J.L. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. salustiano]. **Agricultural Water Management**, n.97, p.614-622, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.005>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- GASQUE, M.; MARTI, P.; GRANERO, B.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P. Effects of long-term summer deficit irrigation on 'Navelina' citrus trees. **Agricultural Water Management**, v.169, p.140-147, 2016.
- GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; CASTEL, J.R. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. II: Vegetative growth. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v.75, n.4, p.388-392, 2000.
- GONZÁLEZ ALTOZANO, P.; CASTEL, J.R. Riego deficitário controlado em 'Clementina de Nules'. I. Efectos sobre la producción y la calidad de la fruta. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.1, n.2, p.81-92, 2003.
- HOLCMAN, E.; SENTELHANS, P.C.; CONCEIÇÃO, M.A.F.; COUTO, H.T.Z. Vineyard microclimate and yield under different plastic covers. **International Journal of Biometeorology**, v.62, p.925-937, 2018.
- HUTTON, R.J.; LOVEYS, B.R. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus-effects on water use efficiency and fruit characteristics. **Agricultural Water Management**, n.98, v.10, p.1485-1496, 2011.
- IAFFE, A.; ARRUDA, F.B. Avaliação do consumo de água em pomar de laranjas em Pindorama, SP, em período de inverno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro Cidade: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, n.26, p.407, 1997.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal - Sistema IBGE de recuperação automática - Sidra**, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- JAMSHIDIA, S.; ZAND-PARSA, S.; KAMGAR-HAGHIGHI, A.A.; SHAHSAVAR, A.R.; NIYOGI, D. Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, n.227, p.105838, 2020.

JESUS, J.F.; COSTA, J.; SANTOS, G.G.; SAMPAIO, A.; COELHO FILHO, M.A. Eficiência produtiva de limão Tahiti sobre diferentes porta-enxertos e quatro lâminas de irrigação no semiárido baiano. In: Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 26, 2019, Juazeiro, BA/Petrolina, PE. Fruticultura de precisão: desafios e oportunidades. **Anais**. Petrolina: Embrapa Semiárido: UNIVASF: SBF, 2019.

JORGE, L.C.; INAMASU, R.Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. Embrapa Instrumentação. capítulo em livro científico (ALICE), 2014.

KANG, S.; ZHANG, J. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, n.55, p.2437-2446, 2004.

KOBAYASHI, E.S.; PIRES, R.C.M.; BODINE JUNIOR, D.; VILLAR, H.L.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Coeficiente de cultura e consumo de água da laranja com irrigação localizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38, 2009, Juazeiro-Petrolina. **Anais...CD-ROM**. Juazeiro-Petrolina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009.

KRIEDEMANN, P.E.; BARRS, M.D. Citrus orchards. In: **Water deficit and plant growth**. Ed. T.T. KOZLOWSKI. New York: Academic Press, v.6, p.325-417, 1981.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2012

LOVEYS, B.R.; STOLL, M.; DAVIES, W.J. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signaling in novel irrigation practice. **Water Use Efficiency in Plant Biology**, p.113-141, 2004.

MACHADO, C.C.; COELHO, R.D. Estudo da distribuição espacial do sistema radicular do limão 'Cravo' enxertado com lima ácida Tahiti. **Laranja**, v.21, p.359-380, 2000.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in southern Brazil. **Agricultural Water Management**, n.98, p.1091-1096, 2011.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.2, p.219-226, 2001.

MARINHO, L.B.; RODRIGUES, J.J.V.; SOARES, J.M.; LIMA, M.A.C.; MOURA, M.S.B.; BRANDÃO, E.O.; SILVA, T.G.F.; CALGARO, M. Produção e qualidade da videira 'Superior Seedless' sob restrição hídrica na fase de maturação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1682-1691, 2009.

MARTARELLO, V.D.; PIRES, R.C.M.; QUAGGIO, J.A.; SILVA, A.L.B.O.; LIMA, M.A.F. Evapotranspiração e coeficiente de cultura de pomar de laranjeiras irrigadas. In: CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 10 e CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 41. 2012, Londrina. **Anais...CD-ROM**. Londrina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2012.

MEDINA, C.L.; RENA, A.B.; SIQUEIRA, D.L.; MACHADO, E.C. Fisiologia dos citros. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundag, p.147-195, 2005.

MONTENEGRO, H.W.S. **Contribuição ao estudo do sistema radicular das plantas cítricas**. 143p., 1960. Piracicaba. Tese (Cátedra) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, 1960.

MOREIRA, C.S. Manejo de solo em pomar cítrico. **Laranja**, v.9, p.423-436, 1988.

MORGAN, K.T.; OBREZA, T.A.; SCHOLBERG, J.M.S. Orange tree fibrous root length distribution in space and time. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, v.2, n.132, p.262-269, 2007.

- NASCIMENTO, E.F. **Desenvolvimento e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração em videira de vinho cv. Syrah (*Vitis vinifera* L.)**. 68p., 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidad Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2010.
- NEVES, D.M.; SANTANA-VIEIRA, D.D.S.; DÓRIA, M.S.; FRESCHI, L.; FERREIRA, C.F.; SOARES FILHO, W.S.; COSTA, M. G. C.; COELHO FILHO, M.A.; MICHELI, F.; GESTEIRA, A.S. Recurrent water deficit causes alterations in the profile of redox proteins in citrus plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.132, p.497-507, 2018.
- OJEDA, H. Riego cualitativo de precisión en la vid. **Revista Enología**, v.1, p.14-17, 2007.
- PARAMASIVAM, S.; ALVA, A.K.; FARES, A. An evaluation of soil water status using tensiometers in a sandy soil profile under citrus production. **Soil Science**, v.165, n.4, p.343-353, 2000.
- PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A. Irrigation management and citrus tree response in a humid climate. **HortScience**, v.35, p.1043-1045, 2000.
- PAVÃO, G.C. **Produtividade e qualidade de frutos de laranjeira Valência fertirrigadas sob déficit hídrico controlado na região centro-sul do Estado de São Paulo**. 54p., 2016. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2016.
- PEDDINTI, S.R.; KAMBHAMMETTU, B.V.N.P. Dynamics of crop coefficients for citrus orchards of central India using water balance and eddy covariance flux partition techniques. **Agricultural Water Management**, v.212, p.68-77, 2019.
- PEREIRA, V.R.; BLAIN, G.C; AVILA, A.M.H.; PIRES, R.C.M.; PINTO, H.S. Impacts of climate change on drought: changes to drier conditions at the beginning of the crop growing season in southern Brazil. **Bragantia**, Campinas, v.77, n.1, p.201-211, Mar. 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052018000100201&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 2 dez. 2020.
- PÉREZ-PÉREZ, J.G.; NAVARRO, J.M.; ROBLES, J.M.; DODD, I.C. Prolonged drying cycles stimulate ABA accumulation in *Citrus macrophylla* seedlings exposed to partial rootzone drying. **Agricultural Water Management**, v.210, p.271-278, 2018.
- PERMANHANI, M.; COSTA, J.M.; CONCEIÇÃO, M.A.F.; SOUZA, R.T.; VASCONCELLOS, M.A.S.; CHAVES, M.M. Deficit irrigation in table grape: eco-physiological basis and potential use to save water and improve quality. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v.28, p.85-108, 2016.
- PIRES, R.C.M.; BODINE JUNIOR, D.; SAKAI, E.; VILLAR, H.L.; SILVA, T.J.A.; ARRUDA, F.B. Effect of trickle irrigation on root development of the wet bulb and 'Pêra' orange tree yield in the State of São Paulo, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1096-1103, 2011.
- PIRES, R.C.M.; LIMA, M.A.F.; SILVA, A.L.B.O.; OHASHI, A.Y.P.; QUAGGIO, J.A. Orange root system distribution under controlled deficit irrigation. In: ASABE ANNUAL MEETING, Kansas. **Anais...** St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013.
- PIRES, R.C.M.; LUCHIARI, D.J.F.; ARRUDA, F.B.; MOSSAK, I. Irrigação. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, p.369-408, 2005.
- PIRES, R.C.M.; SAKAI, E.; FOLEGATTI, M.V.; PIMENTEL, M.H.L.; FUJIWARA, M. Distribuição e profundidade do sistema radicular da videira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Anais...** CD-ROM. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- PIRES, R.C.M.; SILVA, A.L.B.O.; BODINE JUNIOR, D.; SAKAI, E.; GIACOMELLI, V.J.; GIROTTO, E.J.; SILVA, J.A.; KOBAYASHI, E.S. Duration of imposed water deficit periods on irrigated Orange productivity. In: CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37, 2008, Foz do

- Iguaçu. **Anais...CD-ROM**. Foz do Iguaçu: CIGR, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2008.
- POMPEU JÚNIOR, J.; BLUMER, S. Morte súbita dos citros: suscetibilidade de seleções de limão-cravo e uso de interenxertos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.30, n.4, p.1159-1161, 2008.
- POZZAN, M.; TRIBONI, H.R. Colheita e qualidade do fruto. In: MATTOS JÚNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JÚNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, p.799-822, 2005.
- PRADO, H. **Pedologia fácil**: aplicações em solos tropicais. 4. Ed. Piracicaba: Hélio do Prado, 284p., 2013.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C. Some aspects of citrus ecophysiology in subtropical climates: re-visiting photosynthesis under natural conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.4, p.393-411, 2007.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; BRUNINI, O. Ocorrência de condições ambientais para a indução do florescimento de laranjeiras no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.28, n.2, p.247-253, 2006.
- RIBEIRO, T.A.P. **Estudo dos parâmetros básicos de irrigação por microaspersão para a cultura do limão Tahiti (*Citrus limonia*, Osbeck)**, 148p., 1993. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, 1993.
- ROMERO-TRIGUEROS, C.; CABAÑERO, J.J.; TORTOSA, P.A.; GAMBÍN, J.M.; MAESTRE-VALERO, J.F.; NICOLÁS, E.N. Medium-long term effects of saline reclaimed water and regulated deficit irrigation on fruit quality of citrus. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.100, n.3, p.1350-1357, 2020.
- SAMPAIO, A.H.R.; SILVA, R.O.; BRITO, R.B.F.; SANTOS SOARES FILHO, W.; SILVA GESTEIRA, A.; SOUZA, L.D.; COELHO FILHO, M.A. Sweet orange acclimatization to water stress: a rootstock dependency. **Scientia Horticulturae**, v.276, p.109727, 2021.
- SANTOS, D.F. **Extração de água pela cultura do limão 'Tahiti' com porta-enxerto citrumelo 'Swingle' sob microaspersão nas condições semiáridas da Bahia**. 112p. 2002. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002.
- SHALHEVET, J.; LEVY, Y. Citrus trees. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: Series Agronomy, USA, p.951-986, 1990.
- SHIRGURE, P.S.; MARATHE, R.A.; LALLAN, R.; SINGH, S. Irrigation scheduling in acid lime (*Citrus aurantifolia*) as affected by different soil moisture regimes. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.70, p.173-176, 2000.
- SILVA, C.R.; FOLEGRATTI, M.V.; SILVA, T.J.A.; JUNIOR, J.A.; SOUZA, C.F.; RIBEIRO, R.V. Water relations and photosynthesis as criteria for adequate irrigation management in 'Tahiti' lime trees. **Scientia Agricola**, v.62, p.415-422, 2005.
- SILVA, C.R.R.; ROCHA, F.J.; ALVES JÚNIOR, J.; SILVA, T.J.R.; FOLEGATTI, M.V.; MASCHIO, R. Respostas de limeira ácida 'Tahiti' à suspensão da irrigação em diferentes períodos fenológicos. **Laranja**, Cordeiroópolis, v.27, p.321-339, 2006.
- SILVEIRA, L.K. **Produtividade e qualidade de frutos de laranjeira Pêra-IAC fertirrigada com deficit hídrico**. 51p., 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2019.
- SILVEIRA, L.K.; PAVÃO, G.C.; DIAS, C.T.S.; QUAGGIO, J.A.; PIRES, R.C.M. Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: a long-term study on Pêra-IAC sweet orange. **Agricultural Water Management**, v.231, p.106019, 2020.
- SIMÕES, W.L.; COELHO, E.C.; COELHO FILHO, M.A.; GUIMARÃES, M.J.M.; SANTOS, M.R.; COSTA, E.L.C. Transpiration, water extraction, and root distribution of Tahiti lime (*Citrus*

- latifolia* Tanaka) plant under different micro-sprinkler placements. **African Journal of Agricultural Research**, v.14, n.31, p.1369-1378, 2019.
- SMITH, M.; ALLEN, R.G.; MONTEITH, J.L.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S.; SEGEREN, A. **Report of expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 54p., 1992.
- SOUTHWICK, S.M.; DAVENPORT, T.L. Characterization of water stress and low temperature effects on flower induction in Citrus. **Plant Physiology**, v.81, p.26-29, 1986.
- TEIXEIRA, A.H.C.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; SOARES, J.M. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.413-416, 1999.
- TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; BASSOI, L.H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, v.94, p.31-42, 2007.
- TONET, R.M.; LEITE, I.C.; STUCHI, E.S.; SANCHES, F.R. **Florescimento e frutificação da laranja 'Pêra' em bebedouro (SP)**. 2002.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Foreign Agricultural Service**. Citrus: World Markets and Trade. USDA. 11p., Jul. 2020. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- VELEZ, J.E.; INTRIGLIOLO, D.S.; CASTEL, J.R. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily shrinkage. **Agricultural Water Management**, v.90, p.197-204. 2007.
- VIEIRA, D.B.; GOMES, E.M. Determinação da profundidade efetiva do sistema radicular do limão 'Cravo' com copa de lima ácida 'Tahiti'. **Laranja**, v.20, p.419-431, 1999.
- WILLIAMS, L.E.; FIDELIBUS, M.W. Measured and estimated water use and crop coefficients of grapevines trained to overhead trellis systems in California's San Joaquin Valley. **Irrigation Science**, v.34, p.431-441, 2016.
- WILLIAMS, L.E.; AYARS, J.E. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.132, p.201-211, 2005.
- ZANINI, J.R.; PAVANI, L.C. Irrigação em citros. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL EM CITROS: Tratos culturais, 5, 1998. Bebedouro. **Anais**. Campinas, Fundação Cargill, p.409-442, 1998.
- ZEOLI, J.J.S.; PAULA, M.V.B.; CONCEIÇÃO, M.A.F. Suspensão da irrigação durante o período de maturação de frutos em videiras 'BRS Morena'. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 21, 2011, Petrolina. **Anais...** Petrolina: ABID, 2011. p.1-6. 1 CD-ROM.

CAPÍTULO 23

23 MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM PLANTAS MEDICINAIS, AROMÁTICAS E/OU CONDIMENTARES

Patricia Angélica Alves Marques e Catariny Cabral Aleman

Resumo

Nesse capítulo será discutido o impacto do manejo da irrigação na produção de plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares. Essa cadeia produtiva tem despertado crescente interesse nos agricultores devido ao aumento do uso de fitoterápicos e da procura de matéria prima de qualidade pelas indústrias farmacêuticas e de alimentos. O Brasil apresenta grande potencial para participação expressiva neste mercado que cresce ano a ano, principalmente para os produtores familiares. Entretanto, ainda são poucos os estudos sobre o efeito de diferentes regimes hídricos sobre o crescimento e desenvolvimento dessas culturas. Muitos aspectos precisam ser esclarecidos, visando uma relação custo-benefício vantajosa. Alguns estudos de caso foram utilizados com a finalidade de estabelecer uma relação agrônômica e econômica de cultivo irrigado. O orégano e o manjeriço são considerados plantas com grande potencial de mercado e que podem ser um ponto de partida para o desenvolvimento de outras espécies a serem introduzidas de acordo com as necessidades do mercado. A calêndula e camomila, são culturas populares para medicamentos, cosméticos e chás de cultivo tradicional no Sul e Sudeste do País. Observa-se que a deficiência hídrica tem influência na produtividade da parte vegetal de interesse econômico das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares (folha, fruto, flor e/ou óleo essencial), podendo ser positiva ou negativa de acordo com a cultura e variáveis edafoclimáticas. Sendo necessário um estudo direcionado. O manejo de irrigação eficiente é fundamental para garantir a produtividade das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares e produtos finais de qualidade para indústria farmacêutica e fitoterápica.

23.1 Introdução

A irrigação é uma importante tecnologia para garantir o aumento da produtividade agrícola e tornar o processo produtivo mais eficiente. Justifica-se como recurso tecnológico indispensável ao aumento da produtividade das culturas em regiões onde a insuficiência ou má distribuição das chuvas inviabiliza a exploração agrícola. Arelado ao uso da tecnologia é imprescindível o manejo adequado dos recursos hídricos, objetivando atender a demanda hídrica da cultura, evitando, assim, condições de reduzida umidade, que podem acarretar *deficit* hídrico às plantas. Ou seja, o manejo da irrigação deve ter como objetivo maximizar a produção vegetal com o menor consumo de água, agregando sustentabilidade aos recursos naturais, ao menor custo possível.

O uso de plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares tem despertado crescente interesse aos agricultores devido ao aumento do uso de fitoterápicos e da procura de matéria prima de qualidade pelas indústrias farmacêuticas e de alimentos. Além de contribuir para o desenvolvimento agrícola sustentável. Por outro lado, o manejo adequado das espécies medicinais não tem sido satisfatório devido à falta de padronização durante o cultivo, colheita e/ou armazenamento. Essas culturas apresentam potencial de renda, mas sua comercialização requer produtos com alta qualidade e constância no fornecimento aos interessados. É de grande importância que

se estabeleçam linhas de ação voltadas para o desenvolvimento de técnicas de manejo ou cultivo (pesquisas fitotécnicas) dessas plantas, considerando-se a sua utilização pelo homem e a manutenção do equilíbrio dos ecossistemas, respeitando-se as condições edafoclimáticas regionais.

Os estudos sobre o efeito de diferentes regimes hídricos sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares, ainda são poucos. Muitos aspectos precisam ser esclarecidos, visando uma relação custo-benefício vantajosa. Assim antes de se iniciar o cultivo em escala comercial, faz-se necessário conhecer o comportamento da espécie em relação às características climáticas da região de plantio, aos tratos culturais e aos fatores bióticos que são responsáveis pelo desenvolvimento da planta. Assim, é fundamental conhecer a influência da deficiência hídrica na produtividade da parte vegetal de interesse econômico destas plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares.

23.2 Recursos hídricos frente a produção de planta medicinal, aromática e condimentar

Os agricultores não possuem a informação sobre o manejo da irrigação adequado e, ao irrigarem, aplicam água em quantidades menores que as necessárias para a produtividade potencial da cultura ou em demasia, levando ao desperdício do recurso hídrico, perdas de nutrientes por lixiviação e, em alguns casos, a perdas de produtividade. Assim, são necessárias pesquisas neste campo do conhecimento e que seus resultados sejam utilizados para gerar ou adaptar tecnologias que atendam às demandas existentes de matéria prima de qualidade.

A Agricultura Irrigada é responsável pelo uso de aproximadamente 69% da água consumida no mundo, sendo um recurso limitado que vem se tornando escasso em várias regiões agrícolas. Dessa maneira, a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a transferência de tecnologia de irrigação devem ter como objetivos o aumento da eficiência de uso de água na agricultura. Tais fatos têm fomentado a utilização do manejo de irrigação com diferentes lâminas, considerando o manejo como um uso criterioso dos recursos disponíveis para se atingir um determinado objetivo. Em outras palavras, a água aplicada deve ser efetivamente utilizada para a produção, com o mínimo de perdas.

Entre as condições ambientais desfavoráveis às plantas, a deficiência hídrica destaca-se como fator adverso ao crescimento e à produção vegetal, sendo o fator climático aquele que exerce influência direta sobre o desenvolvimento da planta e a produção de princípios ativos. A seca é considerada um estresse ambiental, no qual a demanda de energia pela planta para sua manutenção (sobrevivência) é maior que a produção, o que leva a uma desestabilização inicial das funções da planta, seguida por uma normalização e indução dos processos fisiológicos de adaptação. Além disso, hoje em dia, as mudanças climáticas criam novos desafios para a adaptação de culturas em ambientes estressantes. Os efeitos da seca, ou *deficit* hídrico, nas plantas são bastante variáveis em função de sua intensidade, duração e da fase fenológica de desenvolvimento da planta, sendo a emergência, a floração e a fase inicial de frutificação os estádios mais sensíveis ao *deficit* hídrico. A fase vegetativa e a fase de maturação do órgão colhido constituem-se, geralmente, nos estádios menos sensíveis ao *deficit* hídrico. Os principais processos afetados pelo *deficit* hídrico são bioquímicos e fisiológicos, induzindo a respostas metabólicas e fisiológicas, como fechamento estomático, declínio na taxa de crescimento, acúmulo de solutos e de substâncias antioxidantes, expressão de genes específicos de estresse e de ajuste osmótico (KALAMARTZIS *et al.*, 2020; TAIZ *et al.*, 2017).

A produtividade das plantas dependerá da disponibilidade hídrica e da eficiência de seu uso pelo vegetal. Na maior parte do território brasileiro, a irrigação é uma prática suplementar, isto é, os totais anuais de precipitação pluvial são suficientes para satisfazer as necessidades hídricas da cultura. Todavia, a distribuição irregular das chuvas propicia a ocorrência de períodos de estresse hídrico às plantas, acarretando quebras de produção. Atualmente a questão do uso da água na irrigação tem estado presente em praticamente todos os trabalhos de Engenharia de Água e Solo no mundo. Assim, os profissionais do ramo utilizam ferramentas variadas para otimização do uso e da aplicação da água na irrigação.

Uma das formas de manejo da irrigação para a economia do uso da água é a inclusão da irrigação com *deficit*. O *deficit* hídrico pode ser um fator desfavorável ao crescimento e produção das culturas, pois exerce influência direta sobre o desenvolvimento da maioria das plantas. Contudo, o *deficit* hídrico controlado pode ser utilizado, como forma de manejo de plantas medicinais, aromáticas ou condimentares, sem afetar a quantidade e a qualidade da produção final.

Atualmente há uma demanda crescente por produtos naturais que podem ser obtidos a partir das floras nativas (extrativismo) ou por meio de campos agrícolas cultivados, seguindo as técnicas agrônômicas de sistema de produção. Neste contexto, as plantas medicinais vêm se tornando uma alternativa de renda a pequenos produtores rurais, e o incremento no uso da fitoterapia, tanto para o tratamento como para a cura de doenças tem criado maior demanda para comunidade científica na realização de pesquisas visando o maior desenvolvimento e produtividade das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares.

O uso de plantas medicinais e aromáticas tem origem muito antiga. Seu uso, coleta e cultura, são vinculados aos hábitos social, religioso e terapêutico. Os primeiros indícios do uso foram encontrados em uma escavação em Shanidar, Iraque e datam cerca de 60.000 anos. No início, os medicamentos à base de plantas, em geral, eram utilizados oralmente na forma de pó, infusão (chá) ou cozimento, via tópica, na forma de preparações à base de água ou óleo para unguentos e cataplasmas. Na sociedade moderna são utilizados de forma direta (frescos, secos, congelados ou conservados) ou indiretamente, para a extração de princípios ativos. Assim, o mercado tem se tornado mais exigente e demanda maiores quantidades de produto de qualidade superior, o que leva ao extrativismo (TORRES-CARRERAS *et al.*, 2010; VIEIRA *et al.*, 2010).

O cultivo de plantas medicinais se transformou em uma nova fonte de renda para os produtores rurais. Sua inserção como uma opção do agronegócio ocorreu de forma lenta, mas mostra-se em gradativa expansão em razão do aumento da demanda por produtos naturais com potenciais terapêuticos. Pois a partir dos anos 2000, ocorreu aumento no interesse, pela humanidade, por plantas medicinais e seus respectivos produtos, acarretando a abertura de mercados nacionais e mundiais na área de fitoterápicos e plantas.

A utilização da fitoterapia movimentou um mercado de bilhões de dólares, que amplia o interesse pelo cultivo das plantas medicinais. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), milhões de pessoas em todo o mundo dependem de plantas medicinais e aromáticas para seu bem-estar (cerca de 80% da população mundial) e no Brasil pesquisas demonstram que mais de 90% da população já fez uso de alguma planta medicinal. O uso dos produtos à base de plantas medicinais surge como uma forte tendência mundial, 30% dos medicamentos vendidos em todo o mundo contêm compostos derivados de materiais vegetais. Esse setor é considerado um mercado promissor com números expressivos, tornando-se um ambiente de negócio atrativo com aumento da oferta e demanda de plantas medicinais; entretanto, o sistema produtivo

encontra-se deficiente e despreparado para atender a esse novo mercado (PANDEY *et al.*, 2020; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2008).

O mercado internacional de produtos de plantas medicinais está em expansão e ainda não existem sinais de enfraquecimento com crescimento anual do mercado mundial de fitoterápicos estimado em 10 a 20%, e uma estimativa de mercado mundial de fármacos de US\$ 300 bilhões em 2010, sendo US\$ 20 bilhões derivados de substâncias ativas de plantas medicinais (cerca de 5% do mercado mundial de produtos farmacêuticos) e em 2011, o mercado mundial de fitoterápicos movimentou US\$ 26 bilhões. O mercado específico de fitoterápicos no Brasil obteve uma movimentação nesse mesmo ano de R\$ 1,1 bilhão. No âmbito nacional, a estimativa do mercado de medicamentos é de US\$ 8 bilhões ano⁻¹, com US\$ 1,5 bilhão ao ano derivado de plantas medicinais (CASTRO; ALBIERO, 2016; VIEIRA *et al.*, 2010). Os produtos comercializados englobam desde a planta seca para chás, extratos vegetais, plantas frescas para culinária e óleos essenciais.

Óleos essenciais naturais são misturas de várias substâncias químicas biossintetizadas pelas plantas obtidas por hidrodestilação, utilizados pela indústria de produtos naturais, aromaterapia, entre outras (TORRES-CARRERAS; LOPEZ-GONZALES, 2010). O mercado internacional de óleos essenciais expandiu-se, sendo responsável pela negociação de US\$ 1,8 bilhão. A participação do Brasil é de 0,1%, dos quais 72% são adquiridos por empresas dos EUA, da Europa e do Japão (SANTOS, 2011). Os principais países exportadores mundiais são EUA, França, Reino Unido e Brasil.

O Brasil apresenta grande potencial para participação expressiva nesta fatia de mercado que cresce ano a ano. A agricultura familiar é tida como prioridade na produção de fitoterápicos, pois apresenta vantagens que podem impulsionar a sua cadeia produtiva, como a disponibilidade de terra e mão de obra, conhecimentos tradicionais, experiência com a biodiversidade e práticas agroecológicas e o atendimento de mercados locais e regionais. O setor de plantas medicinais é uma grande oportunidade para os produtores familiares pois oferta uma oportunidade de agregar valor e renda, além da possibilidade de se manter no mercado agrícola com pouca tecnificação e sem a necessidade de alto investimento inicial (BRASIL, 2016; FERNANDES; BOFF, 2017).

O conhecimento dos aspectos relacionados à produção de matéria-prima em quantidade e qualidade deve ser estudado, estabelecendo uma base de atuação nacional forte, alicerçada em pesquisas científicas que facilitará a posterior busca de mercados internacionais. O uso dessas plantas medicinais, aromáticas e condimentares, na manipulação dos fitoterápicos ou uso na indústria e culinária, traria vantagens para o país, como redução da importação e autossuficiência. No caso específico da fitoterapia proporcionaria à população medicamentos mais baratos e de maior valorização das tradições populares. O orégano e o manjeriço são considerados plantas com grande potencial de mercado e que podem ser um ponto de partida para o desenvolvimento de outras espécies que podem ser introduzidas de acordo com as necessidades do mercado.

O Brasil é o país de maior biodiversidade do planeta que, associada a uma rica diversidade étnica e cultural detém um valioso conhecimento tradicional associado ao uso de plantas medicinais. Essas características promovem o potencial necessário para desenvolvimento de pesquisas com resultados em tecnologias e terapêuticas apropriadas. Grande parte da produção brasileira de plantas medicinais não é tecnificada e sim obtida por extrativismo pela agricultura familiar e por pequenos produtores rurais (CORRÊA JÚNIOR; SCHEFFER, 2014). Essas culturas geralmente são conduzidas de forma pouco padronizada, sujeita a variações das condições ambientais, o que pode afetar a produção de biomassa, qualidade e quantidade de óleo essencial.

Devido a sua grande extensão territorial, o país apresenta também características edafoclimáticas peculiares a cada região, que podem interferir de modo positivo ou negativo no desenvolvimento das espécies nativas ou introduzidas, mesmo que as condições sejam semelhantes ao local de origem. Para um cultivo em escala comercial de plantas medicinais, aromáticas ou condimentares, faz-se necessário conhecer o comportamento da espécie com relação aos efeitos climáticos da região de plantio, os tratamentos culturais e os fatores bióticos que são responsáveis pelo seu desenvolvimento, pois a falta de domínio tecnológico de todas as etapas de desenvolvimento levará, provavelmente, a baixa qualidade da biomassa, de rendimento e dos teores dos principais constituintes químicos do óleo essencial.

O *deficit* hídrico pode, além do desenvolvimento, afetar o teor e rendimento desse óleo essencial. Para algumas plantas medicinais, a menor disponibilidade de água pode aumentar a produção de óleo essencial; no entanto isto não ocorre em todas as espécies. Diversas plantas medicinais, aromáticas e condimentares são produzidas com o uso de irrigação suplementar, porém, são poucos os trabalhos referentes ao efeito do estresse hídrico nessas plantas. O efeito sobre tais produtos parece variar bastante com o tipo, a intensidade e a duração do estresse, podendo aumentar ou diminuir o teor de óleos essenciais.

Plantas irrigadas podem compensar o baixo teor de princípios ativos com maior produção de biomassa, o que resulta em maior rendimento final de princípios ativos por área (PANDEY *et al.*, 2020). Como exemplo de estudos temos em pimenteira, Azevedo *et al.* (2005) observaram o aumento da produtividade com uso de lâminas crescentes de irrigação. Em *Thymus vulgaris* L., *Salvia officinalis* L. e *Rosmarinus officinalis* L., Mameli *et al.* (2011) observaram queda de produção de biomassa com imposição de estresse hídrico. Já Abbaszadeh, Farahan e Morteza (2009) verificaram que o estresse hídrico moderado beneficiou o acúmulo de óleo essencial em *Melissa officinalis* L. Khazaie, Nadjafi e Bannayan (2008) observaram no Irã que a variação dos intervalos de irrigação de 7 a 21 dias não alterou a produção de biomassa e de óleo essencial para tomilho (*Thymus vulgaris* Linn.) e hissopo (*Hyssopus officinalis* Linn.). Também no Irã, Ghamarnia, Khosravy e Sepehri (2010) observaram maior eficiência do uso da água para Cominho preto (*Nigella sativa*) com 50% da evapotranspiração de referência (ET_o).

23.3 Manejo de irrigação de plantas medicinais de importância econômica

23.3.1 Orégano (*Origanum vulgare* L.)

O orégano é um condimento obtido por meio de desidratação de suas folhas, que são colhidas na época do florescimento. Trata-se de uma especiaria utilizada principalmente como tempero de massas, na culinária latino-anglo-americana e europeia; é também uma das principais plantas medicinais cultivadas na Alemanha (HONERMEIER *et al.*, 2013). Nos últimos anos o potencial do óleo essencial do orégano tem sido utilizado em síntese de fármacos, fitoquímicos ou como suplemento nutricional de rações (AYALA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2010). Como planta medicinal é utilizada para como antibacteriano e anti-inflamatório (CUI *et al.*, 2019; DUTRA *et al.*, 2019). Vários outros usos dessa planta já foram estudados como por exemplo o efeito inseticida em larvas de coleóptera (CLEMENTE *et al.*, 2003) e o efeito antioxidante do extrato de orégano visando à prevenção da rancidez, mantendo a qualidade organoléptica e nutricional dos alimentos (LEYVA-LÓPEZ *et al.*, 2017).

É uma planta perene, originária das regiões montanhosas do sul europeu, apresenta mecanismo fisiológico C₃, é alógama e pertencente à família Lamiaceae. Trata-se de uma planta condimentar e oleaginosa de porte pequeno, de caule ereto,

por vezes corado de vermelho, com quatro ângulos, apresentando-se ramoso na extremidade superior, podendo atingir até 0,80 m de altura; entretanto, em geral não passa de 0,25 a 0,40 m. As folhas são pequenas, inteiras, pecioladas, ovais, pontiagudas e quase sem pelos. As flores são numerosas, cor de rosa púrpura; o rizoma é rastejante, escuro e com raízes fibrosas (Figura 1). A colheita dos ramos e folhas deve ser realizada antes da floração. As flores são zigomorfas e protegidas por brácteas, que após a polinização cruzada dão origem a minúsculos aquênios (CASTRO; RAMOS, 2002; LORENZI; MATOS, 2008). O produto comercial é composto de folhas secas com umidade de 8 a 12%. Teramoto *et al.* (2009) estimaram um consumo de 4 toneladas de orégano ao dia nas pizzarias do Estado de São Paulo, e que seriam necessários 584 ha de orégano para suprir esta demanda. Comentam, ainda, que esta área é quase três vezes maior que a área plantada de alho para o Estado de São Paulo. Os autores ressaltam que os valores de importação englobam o uso do orégano fresco e seco para fins culinários, perfumaria e medicinal. O mercado brasileiro de orégano forma-se basicamente pela importação da matéria-prima com valores crescentes ao longo dos anos.

Trata-se de um condimento recém-cultivado no Brasil. Até o final do século XX esta especiaria era importada de países latino-americanos, como o Peru e o Chile. A produção de orégano no Brasil começou depois da percepção da alta demanda do tempero na gastronomia brasileira e dos altos preços pagos nas importações. Os principais exportadores do orégano são Chile, Peru, Turquia, Bolívia, México, Síria, Espanha, Itália, Polônia, França e Alemanha (TERAMOTO *et al.*, 2009).

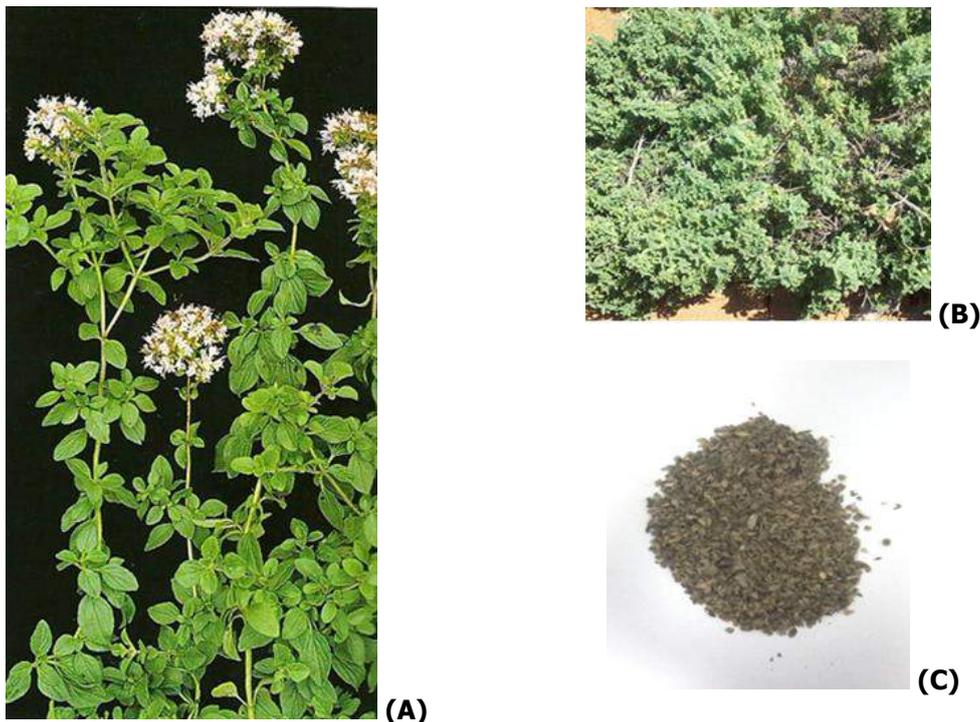


Figura 1. Planta de orégano (A) individual; (B) no campo e (C) seca para comercialização (LORENZI; MATOS, 2008).

Na região oeste do estado da São Paulo, em solo arenoso, Marques, Bernardi Filho e Santos (2009b) constataram que o manejo de irrigação via clima, com lâmina de irrigação de 216,82 mm (100% ECA), promoveu incremento de produtividade do orégano quando comparado as plantas não irrigadas. A ausência de uso de irrigação reduziu cerca de 64,5% da produtividade de matéria vegetal fresco. As variações da

umidade do solo, quando a precipitação é insuficiente ou a irrigação é manejada de forma inadequada, contribuem para resultados insatisfatórios no orégano não irrigado. Um solo com baixo conteúdo de água terá elevada sua resistência ao fluxo de água para as raízes, devido a sua condutividade hidráulica estar baixa; à medida que ocorre o secamento do solo, o contato entre este e a raiz decresce, dificultando a reposição de água pela planta. Em situações de *deficit* não muito severo, o sistema radicular explora o solo em locais que ainda apresentam água passível de ser absorvida.

O orégano é uma planta que em ambientes mais úmidos tem a produção de folhas favorecida (AZIZI; YAN; HONERMEIER, 2009; GERAMI *et al.*, 2016). O teor de óleo essencial também é um parâmetro afetado pela disponibilidade hídrica (MARQUES; BERNARDI FILHO; SANTOS, 2009a; HANCIOGLU *et al.*, 2020). Alguns autores observaram aumento da produção de óleo essencial do orégano com a maior disponibilidade hídrica (MARQUES; BERNARDI FILHO; SANTOS, 2009b; GIANNOULIS *et al.*, 2020) e outros observaram melhores rendimentos do óleo com *deficit* moderado (AZIZI; YAN; HONERMEIER, 2009).

Em Piracicaba (SP) a melhor produção de biomassa seca de orégano foi alcançada usando o potencial matricial -91,2 kPa no manejo de irrigação no pré-florescimento de orégano. A restrição hídrica no solo ao longo de todo o ciclo fenológico favoreceu a produção de óleo essencial, enquanto a restrição hídrica na fase de pré-florescimento possibilitou uma alta produção de biomassa seca de orégano. Os maiores valores para produção de biomassa e óleo essencial foram alcançados para as plantas de orégano cultivadas na primavera/verão (SANTOS *et al.*, 2020).

23.3.2 Manjerição (*Ocimum basilicum* L.)

O manjerição (*Ocimum basilicum* L.), originário da bacia do Mediterrâneo, pertence à família Lamiaceae; é encontrado na Ásia Tropical, na África, na América Central e na América do Sul, apresentando importância econômica no Brasil. Porém, as informações quanto à qualidade aromática dessas plantas em função das técnicas de cultivo, são escassas (FERNANDES *et al.*, 2004). No Brasil, é cultivado principalmente por pequenos produtores rurais para a comercialização da planta como condimento (FEIJÃO TEIXEIRA *et al.*, 2002).

Além do uso in natura o manjerição é muito utilizado para a obtenção de óleo essencial, importante na indústria de perfumaria e na aromatização de alimentos e bebidas, sendo esta forma a que apresenta maior valor agregado (MAY *et al.*, 2019; PEREIRA; MOREIRA, 2011). O manjerição tem grande potencial agrônomo para extração do linalol, pelo teor de óleo apresentado e por ser uma planta de ciclo curto. O óleo essencial de manjerição também apresenta propriedades inseticidas e repelentes.

O manjerição é uma planta herbácea, podendo ser arbustiva, com altura entre 0,30 a 1,00 m, caule lenhoso ou sublenhoso, de aparência tenra e ramificada. É uma planta que permite vários cortes dependendo dos tratamentos culturais. Possui folhas ovaladas ou elípticas simples, membranáceas, com margens onduladas e nervuras salientes, de 4 a 7 cm de comprimento, com coloração verde a verde clara (Figura 2). Pode apresentar grande variação na forma das folhas e no tamanho das plantas. As flores possuem cor branca, rosa ou lilás, reunidas em ráceros terminais curtos; são sésseis, com apenas 1,0 cm de comprimento em média, apresentando de 6 a 100 flores na inflorescência, com pólen alaranjado. O fruto é um tetraquênio, com sementes oblongas, pretas azuladas e pequenas. Um grama possui 800 sementes aproximadamente. A raiz primária caracteriza-se por ser relativamente delgada, hialina,

vilosa com pelos grandes, hialinos e finos. Multiplica-se por sementes e estacas (LORENZI; MATOS, 2008; MINAMI *et al.*, 2007).

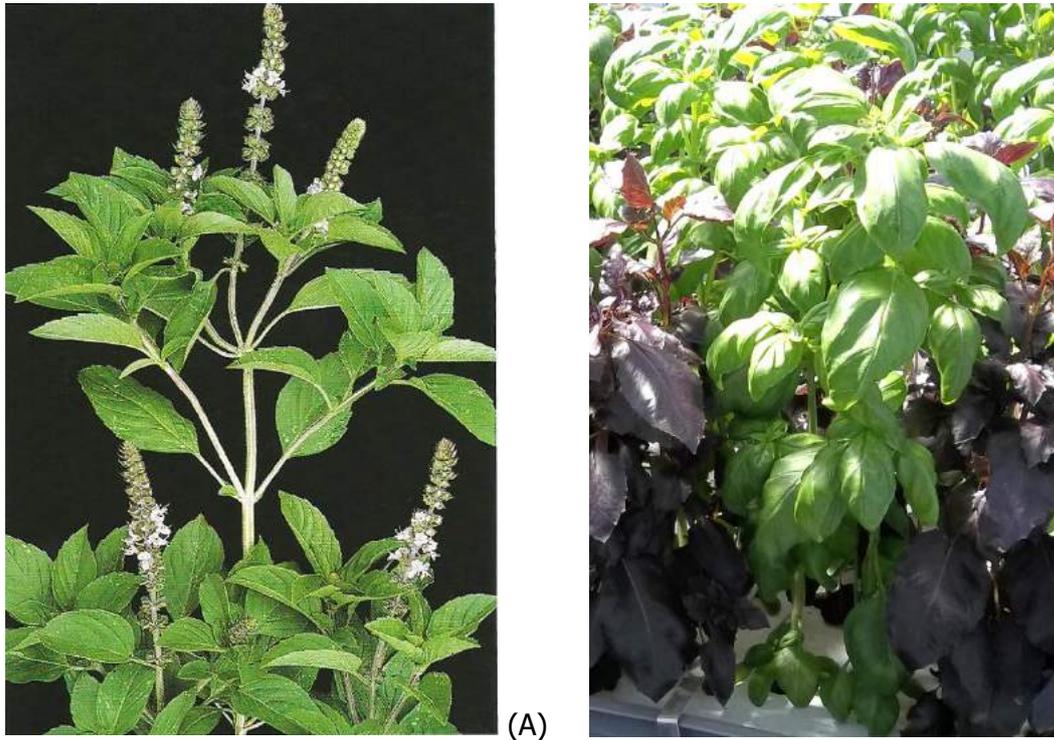


Figura 2. Planta de manjericão (A) individual e (B) no campo (LORENZI; MATOS, 2008).

O valor econômico do manjericão encontra-se na exportação do óleo essencial alcançando níveis significativos de comercialização no mercado nacional e internacional. Estudos recentes têm demonstrado ser possível produzir manjericão com óleo essencial rico em linalol (MAY *et al.*, 2019; PEREIRA; MOREIRA, 2011). A implantação da cultura de manjericão pode ser uma atividade promissora e rentável aos produtores no Brasil. Os EUA, provavelmente, constituem o maior mercado para óleo de manjericão, seguido dos países europeus (Alemanha, França, Reino Unido e Países Baixos).

O manjericão é uma planta que responde ao *deficit* hídrico com queda de produção das folhas. Para Pravuschi *et al.* (2010) a lâmina de irrigação de 100% ECA, em cultivo no oeste paulista, em solo arenoso, promoveu a máxima produtividade de matéria seca e o máximo acúmulo de óleo essencial em manjericão. A produtividade de massa da matéria seca em kg ha^{-1} do manjericão somente apresentou influência das lâminas de irrigação nas segunda e terceira colheitas devido à ocorrência de precipitações bem distribuídas no período do transplântio até a primeira colheita. A partir da segunda colheita, o tratamento irrigado proporcionou o melhor desenvolvimento vegetativo do manjericão, resultando em maior produção de biomassa, estes resultados são semelhantes aos encontrados em manjericão por Biesiada e Kus (2010), em artemísia por Carvalho *et al.* (2003) e Alvarenga *et al.* (2012) para alecrim-pimenta.

O estresse hídrico é geralmente associado à deficiência de umidade no solo, sendo o murchamento de folhas o sinal mais evidente. Na célula, o suprimento de água em níveis inferiores aos requeridos baixará o componente de potencial de pressão do protoplasto sobre a parede da célula, resultando em diminuição do turgor e afetando o crescimento celular (TAIZ *et al.*, 2017). Na terceira colheita deste ensaio as plantas sob estresse hídrico apresentaram uma taxa de mortalidade 75%. O excesso hídrico também

causou alta mortalidade de plantas (70%) provavelmente devido ao excesso de água no solo diário ter causado redução imediata na troca de gases entre a planta e o ambiente, reduzindo o suprimento de oxigênio as raízes, o que em troca limita a respiração, a absorção de nutrientes e outras funções das raízes. Kalamartzis *et al.* (2020) observaram que o manjeriço responde ao *deficit* hídrico de formas diferentes em função dos cultivares, sendo uma cultura possível de lucratividade com *deficit* moderado. Por exemplo, em Piracicaba, José *et al.* (2016) observaram que a supressão da irrigação na pré-colheita promoveu um aumento do teor de óleo essencial das plantas de manjeriço.

23.3.3 Calêndula (*Calendula officinalis* L.)

A *Calendula officinalis* L., pertence à família Asteraceae (Compositae) conhecida como mal-me-quer ou maravilha dos jardins, é uma planta anual. É originária de áreas temperadas do Mediterrâneo e encontra-se amplamente adaptada às regiões Sul e Sudeste do Brasil. Desenvolve-se sob luz plena e apresenta um ciclo de 90 a 120 dias, variando de acordo com a estação de ano em que é cultivada. Locais de clima ameno e boa exposição ao sol favorecem seu desenvolvimento. Apresenta propriedades químicas e morfológicas que garantem sua importância econômica para a indústria alimentícia, ornamental e fitoterápica. Dentre os diversos usos medicinais da planta estão os tratamentos de processos febris, tratamento de cânceres e inflamações de pele. Pode ser empregada na forma de extratos, tinturas e bálsamos produzidos principalmente das flores, as quais apresentam elevada concentração dos princípios ativos. A calêndula começa a florir aos 90 dias após a semeadura e atinge o pico de produção aos 120 dias. O período de colheita pode durar até 60 dias, aproximadamente, após o qual a planta entra em declínio. A produção esperada na safra fica em torno de 720 kg ha⁻¹ de inflorescências secas, podendo chegar a 2000 kg ha⁻¹ (MAZARO *et al.*, 2013).

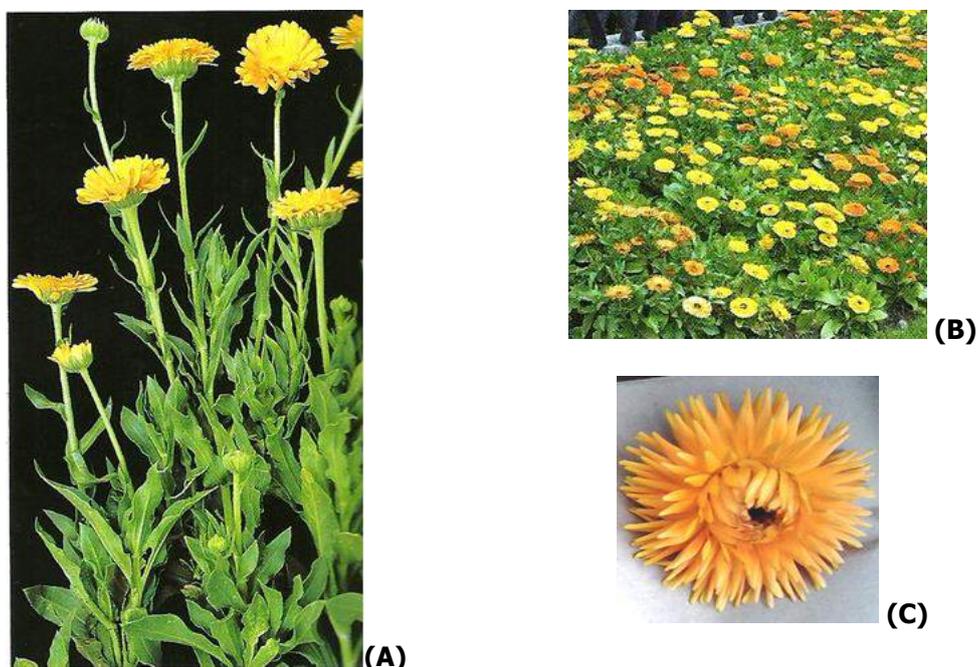


Figura 3. Planta de calêndula (A) individual, (B) no campo e (C) capítulo colhido para processamento (LORENZI; MATOS, 2008).

Sua inflorescência é a parte da planta mais usada para fins terapêuticos como ação cicatrizante, anti-inflamatória e antisséptica. Esta espécie vem sendo estudada em

relação aos flavonoides presentes em suas inflorescências com fins terapêuticos como ação cicatrizante, anti-inflamatória e antisséptica. Na indústria cosmética, é utilizada para a composição de xampus, cremes e sabonetes e na indústria alimentícia como corante natural, além de fazer parte na composição de preparações de medicamentos para eritemas solares, queimaduras e dermatoses secas (CITADINI-ZANETTE; NEGRELLE; BORBA, 2012).

Entre as plantas medicinais, a calêndula possui importância econômica no Brasil, pois além da utilização ornamental, tem uso culinário e terapêutico tradicionais. Encontra-se na lista das 66 plantas medicinais liberadas para a comercialização e o emprego na fitoterapia do SUS (Sistema Único de Saúde) (RELAÇÃO NACIONAL DE PLANTAS MEDICINAIS DE INTERESSE AO SUS, 2010). Estudos dirigidos ao seu valor comercial ainda não estão disponíveis. De maneira geral, a calêndula representa fonte alternativa econômica, principalmente para a agricultura familiar. Nas indústrias de perfumes há aproximadamente 200 formulações constituintes de extratos de *Calendula officinalis* que entram na fabricação de cosméticos, devido aos diversos princípios ativos da planta, que são responsáveis pelos eficientes efeitos no tratamento de pele e cabelos (ADEEL *et al.*, 2017).

Dentre os principais compostos ativos que classificam a calêndula na Farmacopeia Brasileira estão os flavonoides presentes nos capítulos florais, que são compostos fenólicos que compõem uma ampla classe de substâncias com elevada aplicabilidade farmacológica. O principal flavonoide acumulado nas flores da calêndula é a quercetina (BORTOLO *et al.*, 2009; MARQUES; BORTOLO, 2011; MAZARO *et al.*, 2013).

Alternativas para promover a redução do número de frequências de irrigação e em alguns casos, aplicar lâminas de irrigação com *deficit* são necessárias para aumentar a eficiência do uso da água. O cultivo de calêndula irrigada associado ao uso de adubação orgânica pode ser uma alternativa para aumentar a produtividade de inflorescências. Estudos apontam que o cultivo de calêndula no oeste do estado de São Paulo (ALEMAN *et al.*, 2010) foi potencializado com uso de adubação orgânica e *deficit* hídrico controlado. Isso se deve a adubação orgânica promove melhoria na estrutura do solo aumentando a retenção de água e redução das perdas dos nutrientes como nitrogênio, potássio e fósforo. Assim, o uso da adubação orgânica evitou possíveis perdas por lixiviação e/ou percolação ocorridas durante o ensaio devido à alta precipitação (240,6 mm) ocorrida durante todo o período da colheita. Condé *et al.* (2012) e Oliveira *et al.* (2011) comentaram que os resíduos orgânicos podem ser vistos como um complemento da adubação, citam também como vantagem da adubação utilizando esterco de curral, a reciclagem de nutrientes promovendo melhor produção vegetal. O provável aumento da capacidade de retenção favorece, inclusive, o aproveitamento das precipitações quando não é realizado irrigação.

O teor e rendimento de flavonoides é diretamente proporcional a produtividade de inflorescências. Dessa forma, o uso de adubação orgânica com *deficit* controlado determinado através no manejo via clima pode ser uma alternativa eficaz para essa planta medicinal. Meira *et al.* (2013) com melissa e Marques, Bernardi Filho e Oliveira (2009a) com orégano, também observaram incremento na produção de fitomassa fresca e seca com o aumento da irrigação. Em relação ao teor de flavonoides nas plantas, Pacheco *et al.* (2011) comentaram que são poucos os estudos a respeito da influência da disponibilidade hídrica sobre a sua produção.

Com o incremento da disponibilidade água no solo, Aleman *et al.* (2010) observaram aumento da produção dos princípios ativos para os tratamentos sem adubação orgânica e queda na produção de princípios ativos, quando do uso da

adubação orgânica indicando provável excesso hídrico. O excesso de água no solo causa redução imediata na troca de gases entre a planta e o ambiente, conhecido como anoxia ou hipoxia, sofrido pelo sistema radicular, altera o metabolismo celular, provocando queda imediata na respiração das raízes, tanto em plantas tolerantes como nas intolerantes ao excesso de água (YU *et al.*, 2018). De acordo com Gutiérrez (2006), este estresse ambiental promove a formação de etileno devido à privação de O₂, levando a sintomas morfológicos e fisiológicos de situação de estresse. Alvarenga *et al.* (2012) comentam ainda que a produção de flavonoides é sensível ao *deficit* hídrico para a planta, pois o estresse hídrico é considerado um dos fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas.

Existem alguns polímeros que são indicados como condicionadores de solo. O hidrogel é um polímero hidro-retentor derivado do amido (natural) ou do petróleo (sintético) o qual é utilizado principalmente na produção de mudas para aumentar a capacidade de retenção de água no solo. O uso de condicionadores de solos pode ser uma alternativa para potencializar o armazenamento de água no solo. Esses produtos promovem melhorias físico-hídricas do solo favorecendo a redução da quantidade de água em cultivos agrícolas tendo em vista sua capacidade absorviva. A capacidade de retenção pode promover a redução de irrigação e aumentar a eficiência do uso da água (MARQUES; BORTOLO; SANTOS, 2010; MARQUES; CRIPA; MARTINEZ, 2013).

Santos *et al.* (2015) destacam que a utilização do hidrogel melhora a retenção de água proporcionando redução nas frequências de irrigação. Dentre os benefícios do hidrogel destacam-se: desenvolvimento do sistema radicular, crescimento e desenvolvimento das plantas, menores perdas de água de irrigação por percolação, melhoria na aeração e drenagem do solo, e diminuição na perda de nutrientes por lixiviação. Divincula *et al.* (2020) identificaram que o uso de hidrogel pode atuar como um mitigador do estresse hídrico e contribuir para o aumento da produção de capítulos florais da calêndula.

23.3.4 Camomila (*Chamomilla recutita* [L.] Rauschert)

A camomila (*Chamomilla recutita* (L.) Rauschert) é uma planta herbácea, anual, aromática, de até um metro de altura e pertencente à família Asteraceae. Também é conhecida como camomila-comum, matricária ou maçanilha. As flores são reunidas em capítulo compacto, agrupados em corimbos, com as flores centrais amarelas e as marginais de corola ligulada branca. É nativa dos campos europeus, aclimatada na região da Ásia e nos países latino-americanos. Amplamente cultivada em quase todo mundo, inclusive nas regiões sul e sudeste do Brasil (LORENZI; MATOS, 2008). Trata-se de uma planta medicinal com a maior área de cultivo na região do Sul do Brasil, onde é cultivada como cultura de inverno. O Paraná destaca-se como o maior produtor. É uma cultura semeada no período de março a maio. É recomendada utilização de adubação orgânica como requisito da agricultura orgânica. As doses entre 3 a 5 kg m⁻² de esterco de curral curtido proporcionam maior incremento no rendimento do óleo essencial. Sua colheita é realizada quando os capítulos florais estiverem com suas flores totalmente abertas, o que ocorre aproximadamente três a quatro meses após a semeadura (NALEPA; CARVALHO, 2007).

A camomila é uma planta medicinal com elevada demanda hídrica dependendo das condições edafoclimáticas. Em solo arenoso, a irrigação combinada a adubação orgânica pode potencializar a produtividade de inflorescência (ALEMAN *et al.*, 2016). Solos arenosos apresentam elevada taxa de infiltração e reduzida capacidade de retenção. Nessas condições a presença de adubação orgânica, como discutido anteriormente, pode melhorar as características físico-hídricas do solo e contribuir para

disponibilização de água, o desenvolvimento radicular, crescimento e a produtividade de plantas medicinais.



Figura 4. Planta de camomila no campo (Catariny Cabral Aleman).

Para a camomila, condições de estresse hídrico podem afetar o crescimento, desenvolvimento e metabolismo secundário dependendo da fase de desenvolvimento em que ocorrem. Em situações de *deficit* hídrico, processos fisiológicos são afetados negativamente, como a fotossíntese, expansão e divisão celular, acumulação e transferências de nutrientes, síntese de metabólitos secundários, entre outros (SALEHI *et al.*, 2016). Aleman (2011) verificou, no oeste do estado de São Paulo, que as condições edafoclimáticas são fundamentais para identificar qual será o comportamento da camomila quanto a produtividade e síntese de óleo essencial. E conclui-se que a lâmina de irrigação de 150% da evapotranspiração da cultura associado a adubação orgânica resultou maior produtividade de capítulos florais e rendimento de óleo essencial.

23.4 Considerações finais

A deficiência hídrica tem influência na produtividade da parte vegetal de interesse econômico das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares (folha, fruto, flor e/ou óleo essencial), podendo ser positiva ou negativa de acordo com a cultura e variáveis edafoclimáticas. Sendo necessário estudo direcionado.

O manejo de irrigação eficiente é fundamental para garantir a produtividade das plantas medicinais, aromáticas e/ou condimentares e produtos finais de qualidade para indústria farmacêutica e fitoterápica.

Referências

ABBASZADEH, B.; FARAHAN, H.A.; MORTEZA, M. Effects of irrigation of levels on essential oil of balm (*Melissa officinalis* L.). **American-Eurasian Journal of Sustainable Agricultura**, v.3, n.1, p.53-56, 2009.

ADEEL, S.; GULZAR, T.; AZEEM, M.; UR-REHMAN, F.; SAEED, M.; HANIF, I.; IQBAL, N. Appraisal of marigold flower based lutein as natural colourant for textile dyeing under the influence of gamma radiations. **Radiation Physics and Chemistry**, v.130, p. 35-39, 2017.

ALEMAN, C.C. **Efeito da adubação orgânica utilizando esterco de aves e esterco bovino curtido associado com lâminas de irrigação em *Chamomilla recutita* (L.)**

- Rauschert**, 58 p., 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista, 2011.
- ALEMAN, C.C.; MARQUES, P.A.A.; PACHECO, A.C. Chamomile production using supplementary irrigation and organic fertilization in sandy soils. **Revista Caatinga**, v.29, n.2, p.313-319, 2016.
- ALEMAN, C.C.; MARQUES, P.A.A.; SANTOS, A.C.P. Produção de biomassa e capítulos florais da *Calendula officinalis* L. cultivada em viveiro telado, submetida a lâminas de irrigação e diferentes tipos de adubação. **Horticultura Brasileira**, v.28, n.2, suplemento, p.S3287-S3291, 2010.
- ALVARENGA, I.C.A.; LOPES, O.D.; PACHECO, F.V.; OLIVEIRA, F.G.; MARTINS, E. R. Fator resposta do alecrim-pimenta a diferentes lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, n.4, p.462-468, 2012.
- AYALA, L.; SILVANA, N.; ZOCARRATO, I.; GÓMEZ, S. Utilización del orégano vulgar (*Origanum vulgare*) como fitobiótico em conejos de ceiba. **Revista Cubana de Ciencia Agrícola**, v.45, n.2, p.159-161, 2011.
- AZEVEDO, B.M.; CHAVES, S.W.P.; MEDEIROS, J.F.; AQUINO, B.F.; BEZERRA, F.M.L.; VIANA, T.V.A. Rendimento da pimenteira em função da lâmina de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.3, p.268-273, 2005.
- AZIZI, A.; YAN, F.; HONERMEIER, B. Herbage yield, essential oil content and composition of three oregano (*Origanum vulgare* L.) populations as affected by soil moisture regimes and nitrogen supply. **Industrial Crops and Products**, v.29, p.554-561, 2009.
- BIESIADA, A.; KUS, A. The effect of nitrogen fertilization and irrigation on yielding and nutritional status of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). **Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus**, v.9, n.2, p.3-12, 2010.
- BORTOLO, D.P.G.; MARQUES, P.A.A.; SANTOS, A.C.P. Teor e rendimento de flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.) cultivada com diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.11, n.9, p. 435-441, 2009.
- BRASIL. Política e Programa Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos. Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Assistência Farmacêutica. Brasília: Ministério da Saúde, 190 p., 2016. Disponível em: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica_programa_nacional_plantas_medicinais_fitoterapicos.pdf. Acesso em: 1 abr. 2021.
- CARVALHO, L.M.; CASALI, V.W.D.; SOUZA, M.A.; CECON, P.R. Disponibilidade de água no solo e crescimento de artemísia. **Horticultura Brasileira**, v.21, n.4, p.726-730, 2003.
- CASTRO, L.O.; RAMOS, R.L.D. Descrição botânica, cultivo e uso de *Origanum majorana* L. - manjerona e de *Origanum vulgare* L. - orégano (Lamiaceae). Porto Alegre: Fepagro, Circular Técnica, 22, 15p., 2002.
- CASTRO, R.A.; ALBIERO, A.L.M. O mercado de matérias primas para indústria de fitoterápicos. **Revista Fitos**, v.10, n.1, p.1-93, 2016.
- CITADINI-ZANETTE, V.; NEGRELLE, R.R.B.; BORBA, E.T. *Calendula officinalis* L. (Asteraceae): aspectos botânicos, ecológicos e usos. **Visão Acadêmica**, v.13, n.1, p.6-23, 2012.
- CLEMENTE, S.; MAREGGIANI, G.; BROUSSALI, I.A.; MARTIN, S.V.; FERRARO, O.G. Insecticidal effects of Lamiaceae species against stored products insects. **Boletín de Sanidad Vegetal Plagas**, v.29, n.3, p.1-8, 2003.
- CONDÉ, M.S.; HOMEM, B.G.C.; ALMEIDA NETO, O.B.; MAGNO, A.; SANTIAGO, F. Influência da aplicação de águas residuárias de criatórios de animais no solo: atributos químicos e físicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.2, n.1, p.99-106, 2012.
- CORRÊA JUNIOR, C.; SCHEFFER, M.C. As plantas medicinais, aromáticas e condimentares e a agricultura familiar. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.3, p.376, 2014.

- CUI, H.; ZHANG, C.; LI, C.; LIN, L. Antibacterial mechanism of oregano essential oil. **Industrial Crops and Products**, v.139, n.1, 11498, 2019.
- DIVICULA, J.S.; ALEMAN, C.C.; SOUZA JUNIOR, E.P.; MORAIS, J.E.F.; RIBEIRO, S.O.; CECON, P.R.; SANTOS, M.A.L. Manejo sustentável de irrigação utilizando hidrogel no cultivo de *Calendula officinalis* L. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.4, p.19175-19188, 2020.
- DUTRA, T.V.; CASTRO, J.C.; MENEZES, J.L.; RAMOS, T.R.R.; PRADO, I.N.; MACHINSKI JUIOR, M.; GRATON, J.M.; ABREU FILHO, M.B.A. Bioactivity of oregano (*Origanum vulgare*) essential oil against *Alicyclobacillus* spp. **Industrial Crops and Products**, v.129, n.1, p.345-349, 2019.
- FEIJÃO TEIXEIRA, J.P.; MARQUES, M.O.M.; FURLANI, P.R.; FACANALI, R. Essential oil contents in two cultivars of basil cultivated on NFT-hydroponics. **Acta Horticulturae** (ISHS), v.569, p.203-208, 2002.
- FERNANDES, P.; BOFF, P. Medicinal plants in the family farms of rural areas in Southern Brazil: Ecological and ethnobotanical aspects. **Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas**, v.16, n.5, p.493-505, 2017.
- FERNANDES, P.C.; FACANALI, R.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; MARQUES, M.O.M. Cultivo de manjeriço em hidroponia e em diferentes substratos sob ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.22, n.2, p. 260-264, 2004.
- GERAMI, F.; MOGHADDAM, P.R.; GHORBANIM, R.; HASSANI, A. Effects of irrigation intervals and organic manure on morphological traits, essential oil content and yield of oregano (*Origanum vulgare* L.). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.88, n.4, p.2375-2385, 2016.
- GHAMARNIA, H.; KHOSRAVY, H.; SEPEHRI, S. Yield and water use efficiency of *Nigella sativa* L. under different irrigation treatments in a semi-arid region in the West of Iran. **Journal of Medicinal Plants Research**, v.4, n.16, p.1612-1616, 2010.
- GIANNOULIS, K.D.; KAMVOUKOU, C.A.; GOUGOULIAS, N.; WOGIATZI, E. Irrigation and nitrogen application affect Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*) dry biomass, essential oil yield and composition. **Industrial Crops and Products**, v.150, n.112392, 2020.
- GUTIÉRREZ, G.C. Muerta celular programada como respuesta al estrés ambiental. **Revista Chapingó**, v.12, n.2, p.93-99, 2006.
- HANCIOGLU, N.E.; KURUNC, A.; TONTUL, I.; TOPUZ, A. Growth, water use, yield and quality parameters in oregano affected by reduced irrigation regimes. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.8, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.10703?af=R>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- HONERMEIER, B.; ALI, S.; LESCHHORN, B.; MAHMOOD, A.; IJAZ, M.; RUSSO, M.; SHAFIEE-HAJIABAD, M.; ULLAH, M.; ZELLER, S. Cultivation of medicinal and spice plants in Germany - A review. **International Journal of Agriculture and Biology**, v.15, p.1379-1388, 2013.
- JOSÉ, J.V.; MARQUES, P.A.A.; ALVES, D.A.; ROCHA, H.S.; SANTOS, O.N.A.; LENA, B.P.; FOLEGATTI, M.V. Essential oil content of basil under controlled water deficit during pre-harvesting. **Water Resources and Irrigation Management**, v.5, n.2, p.31-39, 2016.
- KALAMARTZIS, I.; DORDAS, C.; GEORGIU, P.; MENEXES, G. The use of appropriate cultivar of basil (*Ocimum basilicum*) can increase water use efficiency under water stress. **Agronomy**, v.10, n.1, p.1-16, 2020.
- KHAZAIE, H.R.; NADJAFI, F.; BANNAYAN, M. Effect of irrigation frequency and planting density on herbage biomass and oil production of thyme (*Thymus vulgaris*) and hyssop (*Hyssopus officinalis*). **Industrial Crops and Products**, v.27, n.3, p.315-321, 2008.
- LEYVA-LÓPEZ, N.; GUTIÉRREZ-GRIJALVA, E.P.; VAZQUEZ-OLIVO, G.; HEREDIA, J.B. Essential oils of oregano: biological activity beyond their antimicrobial properties. **Molecules**, 2017, v.22, 989p.

- LIAO, C.T.; LIN, C.H. Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. **Proceedings of the National Science Council**, v.25, p.148-157, 2001.
- LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil**: nativas e exóticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 544 p., 2008.
- MAMELI, M.G.; ZUCCA, L.; MAXIA, M.; MANCA, G.; SATTA, M. Effects of different irrigation management on biomass and essential oil production of *Thymus vulgaris* L., *Salvia officinalis* L. and *Rosmarinus officinalis* L., cultivated in the southern Sardinian climate (Italy). **Acta Horticulturae (ISHS)**, v.889, p.469-474, 2011.
- MARQUES, P.A.A.; BASTOS, R.O. Uso de diferentes doses de hidrogel para produção de mudas de pimentão. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v.3, n.2, p.53-57, 2010.
- MARQUES, P.A.A.; BORTOLO, D.P.G.; SANTOS, A.C.P. Produtividade de inflorescências de calêndula sob irrigação suplementar na região do Oeste Paulista. **Irriga**, v.16, n.2, p.153-162, 2011.
- MARQUES, P.A.A.; BERNARDI FILHO, L.; OLIVEIRA, R.B. Oregano production under various water depths estimated by means of the class A pan evaporation. **Horticultura Brasileira**, v.27, n.1, p.59-63, 2009a.
- MARQUES, P.A.A.; BERNARDI FILHO, L.; SANTOS, A.C.P. Crescimento, produção de óleo essencial e trocas gasosas em orégano influenciados por diferentes lâminas de irrigação. **Revista Ciência Rural**, v.39, p.1888-1892, 2009b.
- MARQUES, P.A.A.; CRIPA, M.A.M.; MARTINEZ, E.H. Hidrogel como substituto da irrigação complementar em viveiro telado de mudas de cafeeiro. **Ciência Rural**, v.43, n.1, p.1-7, 2013.
- MAY, A.; PINHEIRO, M.Q.; SACCONI, L.V.; JESUS, J.P.F. **Manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)**. Instituto Agrônomo - IAC; Centro de Análise e Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Horticultura, 2019. Disponível em: [www.iac.sp.gov.br.imagem_informacoestecnologicas](http://www.iac.sp.gov.br/imagem_informacoestecnologicas). Acesso em: 1 abr. 2021.
- MAZARO, S.M.; FOGOLARI, H.; WAGNER JÚNIOR, A.; CITADIN, I.; SANTOS, I. Potencial de extratos à base de *Calendula officinalis* L. na indução da síntese de fitoalexinas e no efeito fungistático sobre *Botrytis cinerea*, *in vitro*. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.15, n.2, p.208-216, 2013.
- MEIRA, M.R.; MELO, M.T.P.; MARTINS, E.R.; PINTO, M.J.S.; SANTANA, C.S. Crescimento vegetativo, produção de fitomassa e de óleo essencial de *Melissa officinalis* L. sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Ciência Rural**, v.43, n.5, p.779-785, 2013.
- MINAMI, K.; SUGUINO, E.; MELLO, S.C.; WATANABE, A.T. **A cultura do manjeriço**. Piracicaba: Esalq, 25p., 2007. (Série produtor rural 36).
- NALEPA, T.; CARVALHO, R.I.N. Produção de biomassa e rendimento de óleo essencial em camomila cultivada com diferentes doses de cama-de-aviário. **Scientia Agraria**, v.8, n.2, 2007.
- OLIVEIRA, T.S.; PEREIRA, J.C.; REIS, C.S.; QUEIROZ, A.C.; CECON, P.R.; GOMES, S.T. Composição químico-bromatológica do capim-elefante submetido à adubação química e orgânica. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.12, n.1, p.32-42, 2011.
- PACHECO, A.C.; CAMARGO, E.; CASTRO, P.R.; SOUZA, G.M. Deficiência hídrica e aplicação de ABA nas trocas gasosas e no acúmulo de flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.). **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.2, p.275-281, 2011.
- PANDEY, A.K.; KUMAR, P.; SAXENA, M.J.; MAURYA, P. Distribution of aromatic plants in the world and their properties. Aromatic Plants and Herbs in Animal Nutrition and Health. Cap.6. In: FLOROU-PANERI, P.; CHRISTAKI, E.; GIANNENAS, I. **Aromatic Plants and Herbs in Animal Nutrition and Health**, p.89-114, 2020.
- PEREIRA, R.C.A.; MOREIRA, A.L.M. **Manjeriço**: cultivo e utilização. Brasília: Embrapa Agroindústria Tropical, 31p., 2011.

PRAVUSCHI, P.R.; MARQUES, P.A.A.; RIGOLIN, B.H.M.; SANTOS, A.C.P. Efeito de diferentes lâminas de irrigação na produção de óleo essencial do manjeriço (*Ocimum basilicum* L.). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.4, p.687-693, 2010.

RELAÇÃO NACIONAL DE PLANTAS MEDICINAIS DE INTERESSE AO SUS (RENISUS). 2p. 2010. Disponível em: http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/RENISUS_2010.pdf. Acesso em: 1 abr. 2021.

SALEHI, A.; TASDIGHI, H.; GHOLAMHOSEINI, M. Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. **Asian Pacific Journal and Tropical Biomedicine**, v.6, n.10; p.886-891, 2016.

SANTOS, A.S. **Óleos essenciais: Uma abordagem econômica e industrial**. Ed. Interciencia. São Paulo, 374p., 2011.

SANTOS, H.T.; ALCARDE, R.S.; MORENO-PIZANI, M.A.; MARQUES, P.A.A. Effects of irrigation management and seasonal stages on essential oil content and biomass of *Origanum vulgare* L. **Notulae Scientia Biologicae**, v.12, n.1, p.42-56, 2020.

SANTOS, H.T.; CARVALHO, D.F.; SOUZA, C.F.; MEDICI, L.O. Lettuce growing under automated irrigation and hydrogel application. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.5, p.852-862, 2015.

SILVA, J.P.L.; DUARTE-ALMEIDA, J.M.; PEREZ, D.V.; FRANCO, B.D.G.M. Oregano essential oil: influence of the chemical composition on the inhibitory activity against Salmonella Enteritidis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, n.1, p.136-141, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 6. Ed., 854p., 2017.

TERAMOTO, J.R.S.; FABRI, E.G.; PANTANO, A.P.; MINAMI, K.; SUGIO, P.A.; PACHECO, S.G.A. **Produção de orégano: do plantio à comercialização**. Campinas: IAC, 20p., 2009.

TORRES-CARRERAS, R.L.; LÓPEZ-GONZÁLES, J. Las plantas aromáticas y medicinales: futuro y potencialidad en extremadura. In: COLETO-MARTÍNEZ, J.M.; MUSLERA-PARDO, E.; GONZÁLES-BLANCO, R.; PULIDO-GARCÍA, F. (Ed.) **La agricultura y la ganadería extremeñas: Informe 2010**. Badajoz: Caja de Badajoz, p.139-152, 2010. Disponível em: <http://www.unex.es/conoce-la-uex/estructura-academica/centros/eia/archivos/iag/2010>. Acesso em: 1 abr. 2021.

VIEIRA, S.C.H.; SÓLON, S.; VIEIRA, M.C.; ZÁRATE, N.A.H. Levantamento de fitoterápicos manipulados em farmácias magistrais de Dourados-MS. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.20, n.1, p.28-34, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Bulletin of the World Health Organization**. v.86, n.8, p.577-656, WHO, 2008. Disponível em: <https://www.who.int/bulletin/volumes/86/8/07-042820/en/>. Acesso em: 1 abr. 2021.

YU, Y.Y.; TURNER, N.C.; GONG, Y.H.; LI, F.M.; FANG, C.; GE, L.J.; YE, J.S. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients. **European Journal of Agronomy**, v.99, p.138-147, 2018.

CAPÍTULO 24

24 IRRIGAÇÃO PARA GRAMADOS E PAISAGISMO NO BRASIL

Jose Giacoia Neto

Resumo

A Irrigação para paisagismo e gramados esportivos, sem dúvida é um segmento que ainda tem muito que ser desenvolvido em nosso país, porém já é nítida uma conscientização de várias regiões do valor que o paisagismo irrigado traz ao urbanismo, integração humana e turismo. Este segmento possui uma grande variedade de emissores para as diversas aplicações, desde um campo de golfe a um vaso de flores. A automação do sistema é parte integrante e em constante evolução. O segmento possui subdivisões: residencial, pública, comercial e esportiva. Cada segmento possui linha específica de produtos e tecnologia específicas de instalação e projeto. O profissional desta área deve interagir com arquitetos, engenheiros e outros profissionais do segmento. Temos um mercado pulsante no Brasil e já existem profissionais altamente qualificados.

24.1 Introdução

A irrigação para jardins e gramados, possui várias aplicações e segmentos. Praticamente é instalada sempre com acionamento automatizado. Devido à falta de cultura e parâmetros de avaliação de preços, quando citamos o termo "automatizado" muitas vezes ainda verifica-se um preconceito em relação ao preço. Isso gerou, durante muito tempo, uma ideia errônea de que a irrigação para jardins é muito cara. Porém, o sistema é muito mais acessível do que se imagina, e pode ser instalado em jardins de qualquer tamanho e até mesmo em vasos. A irrigação sempre possui valores menores do que o custo do paisagismo, sendo que em algumas obras representa apenas 20%.

A irrigação para Paisagismo e Gramados se divide nas seguintes áreas: (i) residencial - jardins de qualquer tamanho em casas e edifícios, jardineiras de apartamentos, vasos em varandas, jardins de inverno, coberturas, áreas comuns de condomínios, etc.; (ii) pública - jardins de avenidas, praças e parques; (iii) comercial - universidades, shoppings, complexos de negócios e jardins em empresas, em especial fábricas e indústrias; e (iv) esportiva - campos de futebol, quadras de tênis e campos de golfe.

Verificamos que a abrangência de aplicação deste tipo de irrigação é grande, sendo que para cada segmento de aplicação há séries de produtos específicos, que se adequam conforme as necessidades, com custo em função da aplicação e do paisagismo da área a ser contemplada.

A água é um dos fatores mais importantes para a manutenção da beleza de um jardim. A irrigação pode manter um jardim bonito e vistoso durante todo o ano, desde que bem projetado e instalado.

A irrigação automatizada tem garantido a existência de jardins em locais onde antes não poderia existir. Temos como exemplos os apartamentos de veraneio em praias, que permanecem fechados e só recebem os moradores durante feriados e período de férias. Com um simples sistema de irrigação podemos ter um lindo jardim na varanda, onde antes não havia nada. O mesmo ocorre para casas de sítios, chácaras e fazendas.

É muito importante ressaltar que a irrigação pode também ser instalada em jardins formados. Portanto, podemos implantar o sistema mesmo em jardins mais antigos. O importante é ter-se onde buscar água.

Devidamente projetados e instalados, os sistemas de irrigação automatizados para paisagismo, juntos com a formação da cultura da irrigação na população de nossas cidades, podem otimizar em pelo menos 50% o consumo de água utilizada para a irrigação de áreas verdes.

Em alguns países, como EUA e Espanha, já existem cidades que necessitam de uma aprovação, junto a órgãos governamentais, para o licenciamento de se estabelecer um gramado ou um projeto paisagístico. Em contrapartida, é cobrada ao proprietário uma irrigação eficiente da área. O proprietário de uma casa ou empresa pode receber uma citação e ser punido por estar permitindo a ocorrência de desperdício de água na irrigação do jardim.

Muito importante também é saber que a irrigação para paisagismo é completamente diferente da irrigação agrícola. Os métodos de projetos, equipamentos, instalação, manejo e conservação são específicos. Muitas vezes nos deparamos com excelentes empresas de Irrigação Agrícola projetando sistemas de irrigação para paisagismo de forma equivocada, resultando, muitas vezes, em sistemas sem eficiência e, conseqüentemente, clientes insatisfeitos. Portanto, é muito importante verificar se a empresa contatada possui histórico neste tipo de serviços e se recebe suporte técnico dos produtos que utiliza. No início, a irrigação para áreas verdes era até levada em pouca consideração e muitas vezes tratada como um sistema muito simples. Porém, ao longo dos anos este conceito tem-se modificado, e cada vez mais se verifica a maior complexidade na elaboração dos projetos. Em contrapartida, a instalação do sistema é muito simples e de fácil assimilação. Em questão de dias podem-se treinar equipes de montagem para instalação dos sistemas.

24.2 História da irrigação para paisagismo e gramados esportivos

A invenção do primeiro aspersor de impacto foi um fato de extrema importância para o mundo da irrigação paisagística. Na época a invenção foi comparada a lâmpada de Thomas Edison e o telefone de Alexandre Gram Bell. Orton Englehart foi um cultivador de cítricos residente no sul da Califórnia que inventou o primeiro aspersor de impacto em 1933 e revolucionou a história da produção de alimentos e a iniciou uma nova era na irrigação mundial.

O segundo cliente para este invento foi o Country Club de Los Angeles.

Paralelamente ao desenvolvimento dos sistemas e equipamentos de irrigação de Agricultura tivemos também o nascimento e a evolução da Irrigação para atender áreas paisagísticas.

É muito difícil definir quem e como iniciou a irrigação e a produção de produtos específicos para irrigação de áreas verdes de paisagismo. Durante a evolução da irrigação, muitos produtos agrícolas foram sendo utilizados enquanto os produtos de paisagismo ainda não tinham sido inventados. A única afirmação precisa, é que o berço da irrigação de paisagismo foi na Califórnia nos EUA.

Ao final dos anos 50, finalmente, houve a invenção dos dois produtos mais revolucionários e mais populares para a irrigação de áreas paisagísticas: a invenção dos aspersores plásticos escamoteáveis *sprays* e rotores.

No Brasil o mercado de Irrigação para Paisagismo iniciou-se no ano de 1990, exatamente quando se liberou as importações para nosso país e nasceram as primeiras empresas de Irrigação para Jardins e Gramados esportivos.

O crescimento deste segmento é nítido nos últimos anos e tem-se espalhado por todo país. Hoje já temos empresas internacionais sediadas no Brasil com funcionários especializados.

A partir de 1999, um trabalho incessante de divulgação via palestras, seminários e cursos foi iniciado em universidades, prefeituras, escolas de paisagismo e entidades de classe com o intuito de levar o conhecimento dos sistemas de irrigação. Os eventos técnicos de treinamento e divulgação da tecnologia e seu benefício gerou uma rede sólida de profissionais aptos a projetar e instalar sistemas de irrigação para gramados. O Brasil tem hoje um grande acervo técnico e gente competente em todo o território nacional.

Mas o grande momento de popularização da irrigação para gramados foi a na copa de 2014. O Brasil e o mundo inteiro assistiu os sistemas de irrigação antes e nos intervalos dos jogos. Isso foi um divisor de água e a irrigação passou a ser considerada uma necessidade real que deve ser projetada e instalada com critério e com profissionais qualificados.

A preocupação com o meio ambiente e a utilização de otimizada de água tornaram os sistemas de irrigação automatizados para gramados de extrema importância para o uso racional de água e melhoria da qualidade de vida nas áreas urbanas.

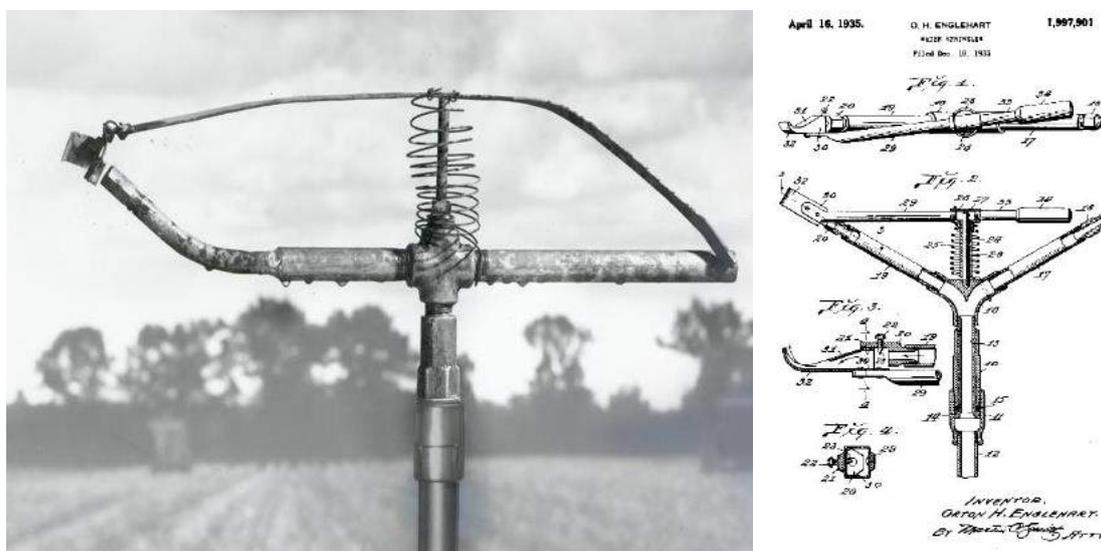


Figura 1. Primeiro aspersor de impacto.

Porém mesmo com 30 anos de existência em nosso país este mercado, infelizmente, a cultura ainda é primária. Em vários pontos do país ainda não se conhece e não temos nenhuma cultura de irrigação. Basta verificarmos o número de caminhões pipa irrigando áreas públicas enquanto que a irrigação é comprovadamente mais econômica e oferece um resultado muito melhor.

24.3 Emissores de água

Existem vários tipos e modelos de dispositivos para irrigação. Cada tipo de aspersor possui uma faixa de aplicações para que cada projetista possa especificá-lo. Os principais tipos de equipamentos são: (i) aspersores *sprays*: para arbustos e escamoteáveis, (ii) aspersores rotores: aspersores de impulso ou de impacto ou rotores, e (iii) emissores para irrigação de baixo volume: borbulhadores, microaspersores tipo micro-sprays, gotejadores e tubos gotejadores.

Quando estamos selecionando aspersores para um projeto, vários fatores devem ser considerados. Alguns deles são: (i) tipos de emissores apropriados, (ii) tamanho e forma das áreas a serem irrigadas, (iii) pressão e vazão disponíveis, (iv) condições ambientes, tais como vento, temperatura, radiação, umidade e sombreamento, (v) tipo de solo e taxa de aplicação aceitável, (vi) compatibilidade entre os aspersores e quais podem ser agrupados juntos.

A forma e o tamanho da área a ser irrigada sempre determinam o tipo de aspersor a ser utilizado. O objetivo é selecionar o tipo de aspersor que irá cobrir a área adequadamente utilizando o menor número possível de aspersores. O tipo de paisagismo a ser irrigado também define qual o tipo de aspersor que deverá ser utilizado. Gramados, arbustos, árvores e maciços de plantas podem exigir diferentes tipos de aspersores.

A pressão e a vazão disponíveis são critérios importantes para seleção de aspersores. Cada aspersor possui uma faixa de trabalho necessária para uma própria operação e estas faixas devem ser adequadas para a vazão e pressão disponíveis.

Áreas com condições climáticas especiais irão necessitar de aspersores especiais. Áreas com alta incidência de ventos necessitarão de aspersores com bocais de ângulo baixo para manter a água próxima ao solo, onde temos uma resistência maior ao arraste de gotas. Locais com altas temperaturas e clima seco ou árido podem necessitar de aspersores com maior vazão, ou ciclos múltiplos de irrigação para manter o paisagismo sempre saudável e recebendo água de acordo com o necessário.

A taxa de aplicação do aspersor não pode exceder a capacidade de absorção do solo. Aspersores (com baixa taxa de precipitação) podem ser necessários para ajustar a taxa de aplicação de água no solo. Aspersores com baixa taxa de precipitação também são necessários em taludes, reduzindo a erosão e o escoamento potencial.

A compatibilidade entre aspersores é particularmente importante quando estamos confeccionando layouts de laterais ou dividindo aspersores em setores ou estações que irão ser comandados pela mesma válvula.

Uma das mais importantes regras para projetos de paisagismo é: "Nunca misturar categorias ou tipo de aspersores dentro de um mesmo setor de irrigação".

Aspersores com diferentes taxas de aplicação devem ser separados em setores diferentes.

Vamos apresentar em detalhe os principais emissores e suas respectivas aplicações e onde devemos selecioná-los dentro de um projeto de paisagismo.

24.3.1 Aspersores *sprays*

Iniciando uma abordagem mais detalhada sobre os emissores, teremos como início os aspersores *spray*. Sem dúvida eles são os emissores mais populares nos sistemas de irrigação para jardins e gramados. Podemos afirmar que 90% dos projetos utilizam aspersores *spray*.

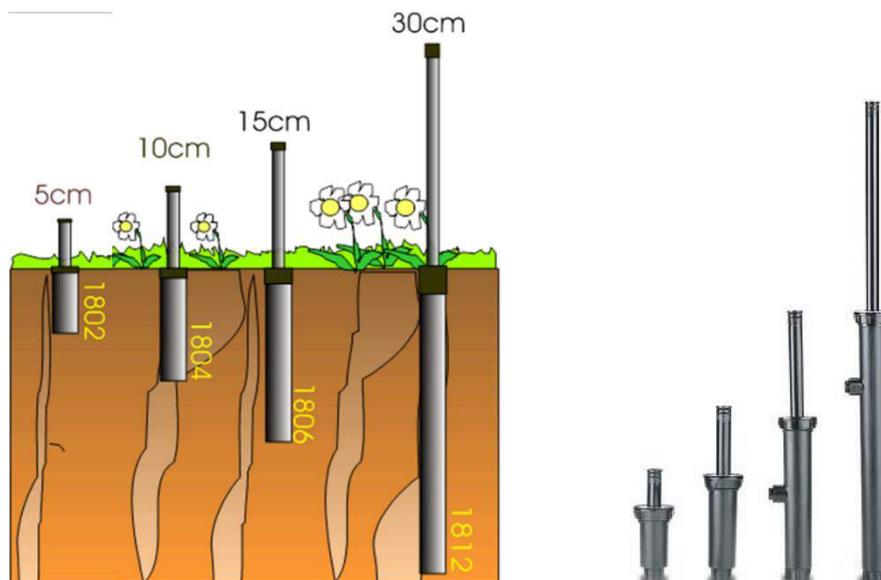


Figura 2. Modelos de aspersores *sprays* e diferentes alturas de elevação.

Estes aspersores podem ser aparentes ou escamoteáveis. Sua utilização e instalação mais frequente são feitas com o modelo escamoteável.

Os aspersores *sprays* lançam água em forma de leque com ângulo pré-definido, de acordo com o projeto. Ou seja, são estacionários, portanto, não giram (Figura 3).

Devido ao fato destes aspersores emitirem água em forma de leque, no ângulo projetado, a irrigação é rápida e uniforme e possuem taxa de precipitação de 16 a 98 mm/h. O projetista deve ter sempre isto em mente, pois eleição do bocal e sua taxa de precipitação depende da textura do solo, da declividade da área e do tipo de planta.

Dentro da série dos aspersores *sprays* existem, basicamente, quatro alturas de elevação do *pop-up* (pistão interno dos aspersores que se eleva quando inicia o seu funcionamento). Estas diferentes alturas de elevação atendem várias situações dentro de um projeto de paisagismo.

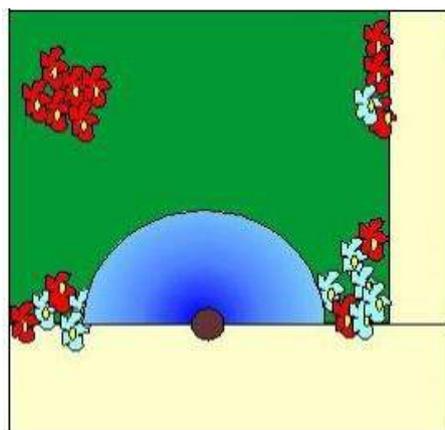


Figura 3. Ângulo do aspersor *spray*.

Existem no mercado aspersores com 5 cm, 10 cm, 15 cm e 30 cm de elevação do *pop-up* (Figura 2), sendo que os aspersores de 5 cm de altura de elevação não devem ser utilizados em nosso País (apesar de algumas empresas insistirem em trabalhar com estes modelos), devido ao fato de nossos gramados sempre estarem com altura acima de 8 cm, o que atrapalha a emissão de água do emissor, prejudicando sua

performance e promovendo uma irrigação inadequada, causando problemas de crescimento do jardim. Isto se agrava mais ainda com certas espécies de gramas como Esmeralda e Santo Agostinho, e onde temos formação de "tacht".

O aspersor de 10 cm de elevação do *pop-up* é o mais utilizado em gramados e forrações de pequeno porte (altura inferior a 15 cm); o modelo de 15 cm de altura de *pop-up* é utilizado em pequenas forrações e maciços de plantas (altura inferior a 20 cm) e o modelo de 30 cm de altura para pequenos arbustos e maciços de plantas (altura superior a 35 cm).



Figura 4. Aspersores *sprays* em funcionamento.

Devido ao fato de termos modelos específicos, de acordo com o paisagismo implantado, e estes modelos possuírem preços diferentes, começamos a concluir que o preço do sistema de irrigação varia de acordo com o paisagismo implantado ou a ser executado.

Outro ponto muito importante na instalação dos aspersores é que, como mostra a Figura 2, eles devem estar nivelados com a superfície do solo. Portanto, no caso de um gramado o aspersor deve ser instalado no nível do solo do tapete de grama. Quando se vê um aspersor acima no nível do gramado sabe-se que a instalação do sistema não foi bem-feita.

Os aspersores escamoteáveis devem ser instalados de forma a: (i) não ferir a estética do paisagismo; (ii) Permitir o trânsito de pessoas sobre o jardim; (iii) permitir a poda de grama com máquinas, sem interferência e danos; (iv) somente serem visualizados em gramados quando o sistema de irrigação estiver em funcionamento; e (v) evitar a ação de vandalismo.

Do exposto até o momento enumeramos abaixo algumas regras básicas sobre a utilização e instalação de aspersores do tipo *spray*: (i) os modelos de altura de elevação do *pop-up* menores que 10 cm não devem ser utilizados em nossos gramados; (ii) os aspersores devem ser instalados no nível do solo para evitar problemas, já que temos diferentes alturas de elevação do *pop-up* para adequar as necessidades específicas de acordo com a altura das plantas dos projetos paisagísticos; e (iii) são utilizados em áreas de dimensões menores. Aplicados em áreas com bordas fechadas e que requerem um direcionamento de água muito preciso, áreas com alta densidade de vegetação que

atrapalham significativamente a superposição de cobertura de rotores e áreas com grande variedade de plantas que necessitam de diferentes quantidades de água.

24.3.2 Opcionais e dispositivos técnicos

24.3.2.1 Válvula Antidreno

O primeiro opcional que temos é a válvula antidreno, chamada por alguns fabricantes de *check valve* ou simplesmente de válvula SAM, que é a abreviatura de "selo de vedação automático", em inglês, termo mais utilizado no Brasil.

Esta válvula antidreno é um dispositivo instalado na base do *pop-up* do aspersor com a função de vedá-lo, ou seja, ela impede que a água contida na tubulação, após o funcionamento da irrigação, saia pelo aspersor nos pontos mais baixos da rede hidráulica do sistema. Normalmente vemos em alguns projetos, após o término da operação do sistema, os aspersores localizados nos pontos mais baixos da área vazando água. A válvula SAM suporta uma coluna de água (diferença de elevação) de até 3 metros, dependendo do modelo do aspersor.

Na Figura 5 temos o primeiro aspersor, instalado no ponto mais baixo, com válvula antidreno e o segundo sem válvula antidreno, ilustrando o vazamento de água que se dá pelo esvaziamento da tubulação.

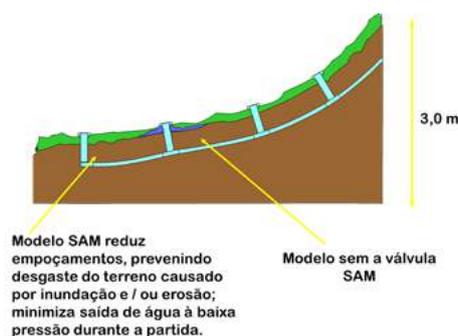


Figura 5. Representação gráfica de aspersor com válvula SAM.

Como podemos concluir, este dispositivo é de suma importância num sistema de irrigação em que temos desníveis dentro da área. Infelizmente, são poucas as empresas que utilizam este recurso como um critério de qualidade. Muitas vezes, pode-se imaginar que a utilização deste dispositivo venha a encarecer o sistema - o que é um pensamento errado, pois não altera 1% do preço final do projeto.

Geralmente, para áreas com declividades de até 10% utiliza-se 10% do total de aspersores com o modelo SAM. Acima deste valor o número salta para 20%.

Logicamente, o ideal seria uma análise das elevações do projeto, mas infelizmente muitos projetos vêm sem esta informação, o que leva a estas estimativas para garantir a qualidade final do sistema.

Nas montagens, a aplicação dos aspersores com válvula antidreno vai pela observação dos pontos mais baixos dos setores. Montadores experientes não necessitam de indicação da localização de onde instalar aspersores com válvulas SAM nos projetos.

A válvula antidreno é também um opcional existente também nos aspersores rotores, que são emissores que iremos abordar posteriormente.

Portanto, esta é uma indagação que sempre podemos tecer quando alguém está oferecendo uma proposta para fornecimento e implantação de um sistema de irrigação para o nosso jardim.

24.3.2.2 Regulador de pressão interno

O segundo opcional, em importância, é um regulador de pressão interno.

Antes de detalharmos este opcional vamos entender um pouco sobre o conceito de pressão da água.

A pressão de trabalho do aspersor *spray* com bocais tradicionais (pressão na base do aspersor *spray*) é de 20m. Portanto, quando não temos pressão (reservatório enterrado, lagos e rios) ou temos uma pressão insuficiente (exemplo: caixa d'água a 15 metros de altura ou pressão de água da rua de 18 m), necessitamos de fonte extra de força para termos a situação de pressão desejada. Esta força é fornecida, geralmente, por um conjunto motobomba.

Quando o aspersor trabalha a uma pressão abaixo da ideal diminui seu raio de alcance, perde a uniformidade de aplicação de água e aumenta o diâmetro das gotas. Como consequência, o jardim "sofre" e o gramado fica manchado e com pontos secos.

E quando temos uma situação inversa? Ou seja, pressão maior do que a necessidade do aspersor. Isto pode ocorrer por vários motivos, como coluna de água muito grande ou projeto superdimensionado (com bombas maiores que a necessidade ou cálculos hidráulicos errados). O aspersor quando está com uma pressão maior que a ideal forma muita névoa (Figura 6) e o tamanho das gotas fica muito pequeno, comprometendo sua *performance*. Em locais com alta incidência de ventos isto é extremamente prejudicial, uma vez que as gotas vão cair em locais diferentes do que o projetado, além de termos uma perda maior por evaporação.

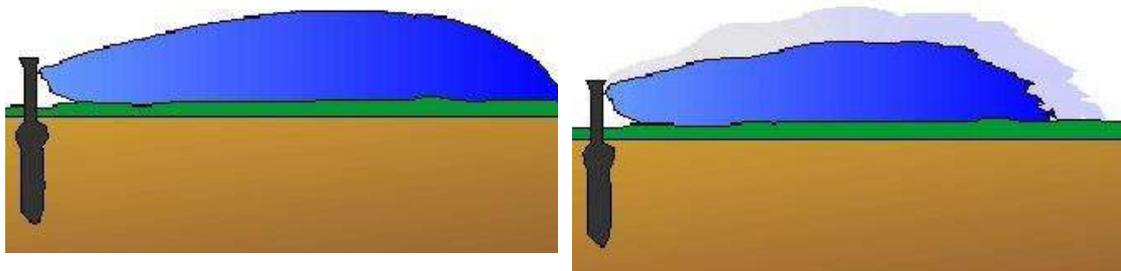


Figura 6. Aspersor operando na pressão ideal (esquerda) e com pressão baixa (direita escura) ou excessiva (direita clara).

Para corrigir o erro devido ao excesso de pressão há um dispositivo que alguns fabricantes trazem em seus aspersores - um regulador interno - que reduz a pressão no aspersor e a mantém a 20 m para os bocais tradicionais e um outro modelo que regula a pressão para 30 m quando utilizamos os bocais rotativos.

No caso de instalação em áreas públicas, na ocorrência de vandalismo (quebra de bocal ou furto) o ponto tende a "roubar" água do sistema, com consequente comprometimento do funcionamento do setor onde o aspersor está instalado. Com a utilização de aspersores *sprays* com reguladores de pressão pode-se evitar até 70% do desperdício de água que este dano provocaria.

24.3.3 Bocais para aspersores *sprays*

A seleção de bocais para atender à arquitetura da área e o paisagismo instalado é um “grande quebra-cabeça”. Infelizmente, alguns projetistas optam pela padronização, utilizando poucas opções e o projeto fica deficiente. Para ilustrar temos hoje em torno de 56 opções de bocais, todos acompanhados de um filtro de proteção contra entupimento. Os projetistas arrojados fazem uso do máximo de possibilidades possíveis.

O raio de alcance de um bocal de aspersor *spray* pode variar de 1,2 m a 7,3 m. Os bocais para aspersores *sprays* são divididos em três categorias: (i) bocais de ângulo fixo MPR, (ii) bocais de ângulo fixo MPR e (iii) bocais rotativos.

24.3.3.1 Bocais de ângulo fixo MPR

Bocais de ângulo fixo MPR (Figura 7) são bocais que possuem ângulo fixo de atuação, ou seja, se o ângulo de atuação é 180° ele não varia. Estes bocais possuem várias séries de raios e, dentro de cada série, vários ângulos de atuação. Por exemplo, o bocal da série 12 de vários fabricantes tem 3,6 metros de raio de alcance e possui, dentro da série, bocais com ângulos de 90°, 120°, 180°, 240°, 270° e 360°. Além destes ângulos existem os ângulos de trajetória, que alteram a altura do jato de água. Existem ainda séries especiais de bocais, como os de forma quadrática, que podem operar em faixas para atender áreas com canteiros centrais de avenidas, rampas de garagem, taludes estreitos, jardins em faixas e várias outras aplicações. O importante é verificar se a vazão do bocal é proporcional ao ângulo, ou seja, a vazão do bocal de 90° tem que ser metade da vazão do bocal de 180° e assim por diante. Deve-se observar que nem todos os bocais encontrados no mercado possuem esta característica.



Serie 12 MPR						
Trayectoria de 30°						
Tobera	Presión bar	Radio m	Caudal m³/h	Caudal l/m	Precip. mm/h	Precip. mm/h
12F	1,0	2,7	0,40	6,8	55	63
	1,5	3,2	0,48	8,3	47	54
	2,0	3,6	0,59	9,7	46	53
	2,1	3,7	0,60	9,8	44	51
12H	1,0	2,7	0,20	3,4	55	63
	1,5	3,2	0,24	4,2	47	54
	2,0	3,6	0,30	4,9	46	53
	2,1	3,7	0,30	4,9	44	51
12Q	1,0	2,7	0,10	1,7	55	63
	1,5	3,2	0,12	2,1	47	54
	2,0	3,6	0,15	2,4	46	53
	2,1	3,7	0,15	2,5	44	51

Figura 7. Bocal MPR para aspersor *spray* e exemplo de Tabela de seleção de bocais.

24.3.3.2 Bocais de ângulo fixo MPR

Bocais de ângulo fixo MPR, comumente chamados de bocais VAN (Figura 8) - são bocais que admitem ajuste do ângulo de atuação, utilizados em locais com ângulos diferentes aos dos bocais MPR e/ou limites curvos de áreas. Alguns são facilmente ajustados manualmente e outros precisam de ferramentas especiais, o que dificulta a manutenção. Alguns bocais VAN são ajustáveis de 0 a 360°.



Figura 8. Bocal de ângulo variável VAN para aspersor spray.

A distribuição de água e a uniformidade de aplicação são as características mais importantes de um bocal. Áreas com alta incidência de ventos e taludes íngremes (inclinação $> 45^\circ$) exigem bocais especiais. Estes bocais são idênticos aos bocais MPR, porém com mais orifícios para garantir maior uniformidade e aplicação de água próxima ao aspersor.

Portanto, a escolha do bocal é um passo decisivo em um projeto, sendo a experiência e versatilidade do projetista um fator crucial.

24.3.3.3 Bocais rotativos

Os bocais rotativos foram lançados no mercado brasileiro em 2005, consagrados em 2006 e hoje estão presentes em todo Brasil. Todos projetistas atualizados e arrojados já utilizam esta tecnologia.

Os Bocais Rotativos possuem jatos múltiplos e com diferentes alcances e ângulo de trajetória para distribuir água de forma uniforme. Possuem uma taxa de precipitação baixa ($14-18 \text{ mm h}^{-1}$) e foram projetados para serem instalados nos aspersores da série spray.

O produto é um testemunho no compromisso com o uso inteligente da água, pois os Bocais Rotativos economizam água, reduzem a erosão e o escoamento superficial, ao mesmo tempo em que aumentam a homogeneidade e diminuem o tempo de instalação de um projeto.

A baixa taxa de precipitação dos Bocais Rotativos e sua baixa vazão (aproximadamente 60% menor que a dos bocais *sprays* convencionais) permitem maior número de aspersores por setor. Por aplicarem água de forma mais lenta, são ideais para irrigar taludes e solos altamente compactados.

Em situações de alta incidência de vento, onde os bocais convencionais de *sprays* têm seu desempenho comprometido, os Bocais Rotativos trabalham bem, devido às suas gotas grandes e ângulo de trajetória baixo de seus jatos. Este é um ponto importante a avaliar no bocal rotativo adquirido.

Apesar de estarem instalados em aspersores *sprays*, os Bocais Rotativos possuem pressão de trabalho e precipitação semelhantes aos aspersores rotores. Os bocais podem ser instalados no mesmo setor de aspersores rotores de alguns modelos. Portanto, não é necessário acrescentar uma nova tubulação e uma nova válvula para criar um novo setor quando as dimensões da área diminuem.

Os bocais rotativos estão disponíveis em modelos de acordo com o raio real de alcance. O raio de alcance real encontrado no mercado varia de 4 m a 10 m em ângulos de atuação fixos. O alcance é regulado manualmente ou através de ferramentas. Esta regulagem permite a acomodação do mesmo bocal em várias situações, de acordo com o paisagismo e a arquitetura do jardim.



Figura 9. Bocais rotativos.

24.3.4 Opcionais de instalação

Em alguns casos os aspersores não necessitam ou não podem ser instalados na forma escamoteável. Por exemplo, uma vegetação densa com altura superior a 60 centímetros (lembrando a máxima elevação de altura do *pop-up* é de 30 cm). Nestes casos há a alternativa de realizar a instalação do bocal do aspersor *spray*, através de um adaptador (Figura 10), diretamente em um tubo de subida. Assim, temos uma instalação mais econômica e podemos instalar os bocais na altura mais conveniente.

A opção de instalação aparente tem várias aplicações práticas, como o uso em hortas, resfriamento de telhados, estufas, casas de vegetação, viveiros de plantas e até mesmo na produção agrícola, visto que podemos utilizar toda a versatilidade e variedade de situações que os bocais dos aspersores *sprays* nos proporcionam.

Portanto, para áreas menores e de formas variadas, onde precisamos de aspersores aparentes ou até mesmo instalados aéreos, este adaptador é uma excelente opção.



Figura 10. Adaptador para arbustos e extensor para aspersores.

Como mencionado no início da abordagem sobre os aspersores *sprays*, são utilizados na grande maioria dos sistemas de irrigação, portanto é de suma importância o detalhamento de todas as características, aplicações e formas de instalação deste

equipamento. Os sistemas de irrigação para gramados esportivos são os únicos em que estes aspersores raramente têm utilidade.

O acessório de instalação mais importante são os flexíveis que são instalados entre o aspersor e a tubulação. A função é facilitar a instalação e proteger a tubulação de ruptura por impacto ou sobrepeso acima do aspersor. O sistema flexível é considerado acessório obrigatório de instalação em vários países.



Figura 11. Imagem de aspersor *spray* com flexível conectado a um "T" de PVC.

Devidamente instalados, são equipamentos que raramente necessitam de manutenção, necessitando de limpeza somente quando há problemas com qualidade de água e/ou alguma quebra de tubulação que tenha permitido a entrada de sujeira na rede hidráulica.

Infelizmente, para sistemas mal projetados e instalados, o aproveitamento e a recuperação do que já foi feito é muito difícil. Nestas situações o ideal é aproveitar apenas os emissores e equipamentos em bom estado e refazer o projeto.

24.3.5 Aspersores rotores

Os aspersores rotores, após os aspersores *sprays* são os equipamentos mais populares em irrigação para jardins e gramados.

A utilização e a aplicação destes aspersores se iniciam exatamente onde termina a aplicação dos aspersores *sprays*, ou seja: (i) áreas de dimensões maiores (largura superior a 7,5 m), (ii) paisagismo de menor estatura e densidade, (iii) gramados livres, (iii) grandes taludes, (iv) gramados esportivos, (v) quadras de tênis, e despoejamento.

Como o próprio nome sugere, são aspersores que giram, portanto, não possuem uma aplicação estática e em ângulos fixos de trabalho como os aspersores *sprays*. São equipamentos mais robustos e mais complexos.

A classificação dos aspersores rotores é relativa ao mecanismo que faz com que eles girem e estão discriminadas a seguir: (i) aspersor rotor de impacto – gira através do impacto de um braço oscilante. Para melhor entendimento, é como os aspersores utilizados em agricultura, em que se vê um braço batendo no jato de água, produzindo um barulho característico, e (ii) aspersor rotor de engrenagens – este modelo gira por meio de uma turbina de engrenagem que se movimenta quando a água passar por ele, resultando na rotação do aspersor. Este modelo é o mais popular e o mais utilizado.

Os aspersores rotores para paisagismo possuem uma ampla faixa de vazões, variado de $0,12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $8,24 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($0,03 \text{ L s}^{-1}$ a $2,29 \text{ L s}^{-1}$), e também uma ampla faixa

de raios de alcance que variam de 4,6 m a 24,6 m.

Vale salientar que existem ainda os aspersores rotores para campos de golfe, pertencentes a uma classe muito específica de utilização devidos às diferenças de operação, características e aplicações. Somente para ilustrar, o raio de alcance de aspersor rotor para campos de golfe pode atingir até 35 metros.

Os rotores que iremos tratar são divididos em duas categorias: (i) aspersores rotores de médio alcance - raio de alcance variando de 4,6 m a 15 m, e (ii) aspersores rotores de longo alcance - raio de alcance variando de 12 m a 24,6 m.

Os aspersores da primeira categoria são utilizados em residências, hotéis, fábricas e indústrias, parques, e até mesmo em alguns gramados esportivos. Já os rotores da segunda categoria são utilizados, principalmente, para grandes gramados e campos de futebol.

Estão disponíveis nas versões escamoteável e aparente. A versão aparente deve ser utilizada em grandes áreas de arbustos ou com alguma cobertura vegetal de alta densidade de plantio. A versão escamoteável é mais utilizada em gramados e coberturas de pequeno porte (até 30 cm).



Figura 12. Aspersores rotor.

Estes aspersores possuem várias formas para utilizar a vazão e a pressão no acionamento do mecanismo de rotação.

Geralmente, os aspersores rotores possuem um único ou um par de bocais, que gira para distribuir a água em sua área de cobertura. Os de ângulo regulável possuem um mecanismo de reversão para fixar sua rotação dentro do ângulo estabelecido. Existem alguns aspersores que podem ajustar o ângulo em até 360° na mesma unidade, mas existem modelos que possuem duas versões: círculo cheio e círculo parcial.

Necessitam de maiores pressões para operação, sendo que a faixa dentro dos diversos modelos pode variar de 20 m até 70 m.

Os aspersores rotores geralmente aplicam água mais lentamente do que os *sprays*. Isto é devido ao fato de terem a mesma vazão para atender áreas muito maiores. A taxa de aplicação de água destes aspersores varia de 6 mm h⁻¹ a 25 mm h⁻¹ esta característica também faz com que sejam apropriados para áreas de taludes, solos pesados e outras onde necessitamos de menores taxas de aplicação de água.

Instalações com aspersores de longos raios de alcance são bem mais econômicas que aspersores *sprays*. Teremos poucos aspersores, conseqüentemente poucas conexões e poucas valas a serem abertas.

Alguns detalhes gerais dos aspersores rotores de médio alcance são idênticos aos dos aspersores *sprays*. Eles também podem ser escamoteáveis ou aparentes e

também podem possuir o opcional da válvula antidreno (válvula SAM), que impede que a água dentro dos tubos "vaze", logo após o término da irrigação, para os pontos mais baixos da área, provocando alagamentos e/ou erosão no solo.

24.3.6 Aspersor rotor de impacto

Este modelo de aspersor, na sua versão escamoteável, nada mais é que o tradicional aspersor agrícola, que vemos nas plantações, dentro de um casulo, de forma que fique somente escamoteável. Como o próprio nome diz, ele funciona através do impacto de um braço oscilante que, além de fazer o aspersor girar, promove a dispersão do jato d'água para uniformizar a aplicação de água.

O raio de alcance deste aspersor vai de 6,8 m até 14 m.

Como não possui nenhum mecanismo interno, é recomendado para aplicação com águas residuais ou bombeadas diretamente de lagos, represas e/ou rios. Como a água passa diretamente sem contato com nenhuma peça interna, temos um equipamento menos susceptível ao entupimento. Outra vantagem importante é o fato deste aspersor ter sido o primeiro com ângulo de bocal "baixo", que é o fato do mesmo lançar água, com raio de até 10 metros, próximo ao solo. Esta característica é extremamente importante em situações de ventos fortes e crista de taludes.

As desvantagens deste produto são bem específicas e algumas têm feito sua utilização diminuir em todo o mundo. Primeiramente, é muito fácil de regular seu ângulo de ação, que é uma vantagem, mas também é fácil de ser desregulado pelo contato humano. Portanto, não é indicado para áreas públicas, onde poderemos ter problemas com vandalismo. Outro problema crucial diz respeito à cobertura do gramado com areia, pois quando ele se eleva para efetuar a irrigação, a areia pode entrar em seu casulo até o ponto de causar seu travamento, perdendo sua rotação e retração. Importante frisar que isto não danifica o aspersor, sendo que o problema é ter de desmontá-lo para limpeza.



Figura 13. Aspersor rotor de impacto.

24.3.7 Aspersor rotor de engrenagens

Este modelo de aspersor rotor é, hoje, o mais popular e utilizado no mercado brasileiro e em várias partes do mundo. Encontramos algumas regiões, como alguns países da América Latina, em que outros modelos são mais populares e mais utilizados.

Dentro dos tipos de rotores existentes é, sem dúvida, onde temos a maior tecnologia e estudos envolvidos. É a melhor opção para gramados esportivos de campos de futebol, campos de golfe e quadras de tênis de saibro e de grama.

Este aspersor é de funcionamento silencioso, o que agrada muito os clientes, e seu giro é efetuado através da passagem da água por uma turbina de engrenagens, que ao se movimentarem provocam a rotação do aspersor.

Estes aspersores possuem raios de alcance de 6,8 m a 24,6 m dentro dos modelos para áreas paisagísticas, mas podem chegar até 36 m de raio em rotores próprios para campo de golfe.

Um dos principais detalhes e cuidados importantes na instalação destes equipamentos é a verificação da qualidade da água, pois são os mais susceptíveis a problemas de entupimento e de perda de rotação devido a impurezas sólidas dentro do "motor" de engrenagens. Portanto, uma boa limpeza na rede hidráulica, antes da instalação dos rotores, e a verificação da necessidade de filtragem são essenciais para um bom funcionamento de um sistema de irrigação com rotores de engrenagem.



Figura 14. Modelos de Aspersores rotores de engrenagem.

Um detalhe interessante é o fato de encontrarmos pessoas acusando algum problema de funcionamento do aspersor ao fabricante e/ou ao próprio tipo de aspersor, quando na maioria das vezes o problema está na instalação e na limpeza do aspersor.

Hoje temos alguns modelos que, como os aspersores por rotação por meio de turbina de esferas, possuem a característica que chamamos de "memória de arco" que descrevemos em nosso último artigo.

Uma grande vantagem que este equipamento possui é a versatilidade de aplicação, em modelos de três alturas diferentes de elevação do *pop-up*. Assim, como nos *sprays*, temos aspersores que possuem 4" (10 cm), 5" (12,5 cm), 6" (15 cm) e 12" (30 cm) de elevação para atender as diferentes situações dentro do projeto de paisagismo.

Geralmente, as regulagens dos ângulos de atuação são obtidas por ajustes simples na parte superior do aspersor, sem a necessidade de ferramentas especiais.

Em locais onde não temos a necessidade de aspersores escamoteáveis há a opção do modelo aparente, assim como o adaptador para arbustos que mostramos em nosso capítulo para *sprays*.

24.3.8 Bocais para aspersores rotores

Aqui, sem dúvida, é onde temos a maior tecnologia nestes produtos. Temos alguns fabricantes que mesmo com bons produtos, em termos de mecanismo de rotação, deixam a desejar na *performance* do bocal. Os bocais têm que ser meticulosamente estudados e projetados para termos a melhor uniformidade de aplicação de água possível. A melhor tecnologia existente é conhecida como "Cortina de Chuva", onde a água é aplicada de forma a garantir precipitação suave e uniforme ao longo de todo o jato de água.

Existem também outros bocais especiais, como os de ângulo baixo, muito utilizados em locais com alta incidência de ventos e/ou crista de taludes.



Figura 15. Rotores em funcionamento em um estádio de futebol.

24.3.9 Emissores de baixo volume

A irrigação de baixo volume é o segmento da irrigação para paisagismo que mais cresce no mundo. As construções sustentáveis e a entrada das paredes verdes e tetos verdes no paisagismo é uma realidade que veio para ficar.

O primeiro emissor de baixo volume inventado foi o gotejador. Ele foi concebido em Israel e sua primeira aplicação foi para irrigação agrícola. Os gotejadores foram inventados no início dos anos 60.

Como o próprio nome diz, trata-se de um emissor que emite gotas para realizar a irrigação. Sua instalação é realizada de forma a aplicar água diretamente na zona

radicular das plantas. No nosso caso aplicamos água diretamente em uma planta podendo ela estar fazendo parte de um jardim ou isolada em um vaso.

Como em irrigação para jardins, procura-se sempre a discrição nas instalações, temos diversas formas de instalar os emissores. Sendo assim, serão apresentados os modelos existentes de gotejadores: (i) Gotejador unitário ou de botão, (ii) tubo gotejador, (iii) tubo gotejador para uso aparente, e (iv) tubo gotejador para uso enterrado.

24.3.9.1 Gotejador unitário ou de botão

Produtos comercializados separadamente ou vendidos inseridos nas tubulações. É o modelo de gotejador mais indicado para irrigação de vasos e/ou plantas isoladas (arbustos e árvores) dentro de um projeto de paisagismo. São comercializados em vários modelos e fabricantes e possuem vazão específica de trabalho, ou seja, são autocompensantes. Por exemplo: temos modelos de vazão de 2 litros por hora ($L h^{-1}$), 4 $L h^{-1}$, 8 $L h^{-1}$, etc.

Estes emissores, quando vendidos separadamente, são inseridos diretamente na tubulação de polietileno que conduz a água, ou levado até os locais de irrigação através de microtubos.

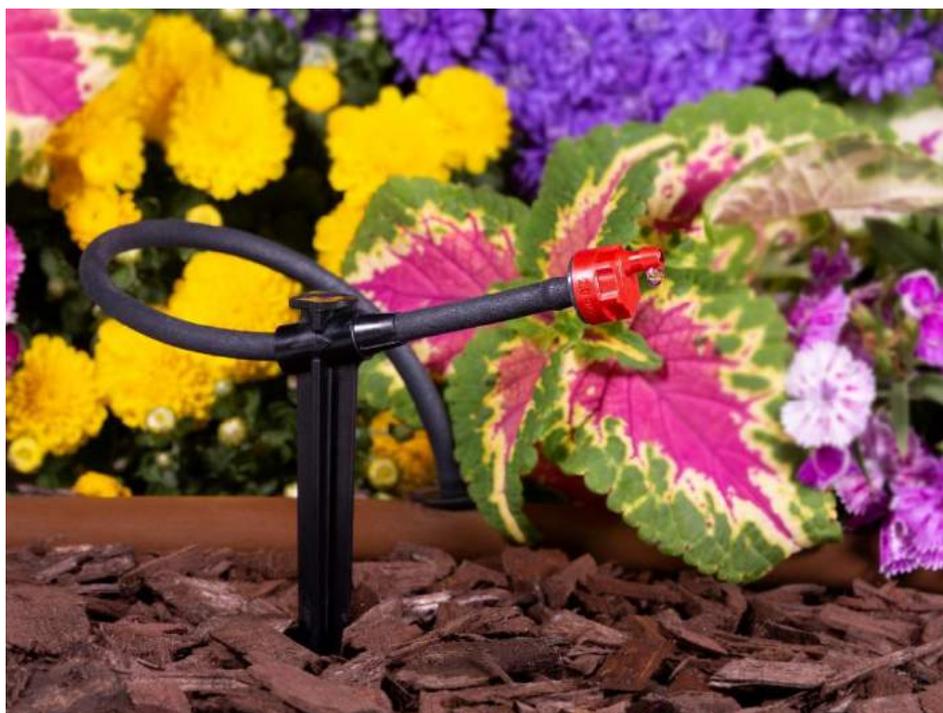


Figura 16. Gotejador de botão autocompensante com diferentes vazões, inseridos em tubo de polietileno.

24.3.9.2 Tubo gotejador

Tubo de polietileno gotejador, no qual o gotejador foi inserido no interior do tubo através de uma tecnologia própria. Ou seja, no processo de fabricação já se instala o gotejador na tubulação, podendo ser no interior do tubo ou já fazendo parte da própria parede da tubulação, como no caso das fitas gotejadoras. Este tipo de emissor é mais utilizado para irrigação de maciços de pequenos arbustos e forrações vegetais. Um exemplo típico é a irrigação de cercas vivas.

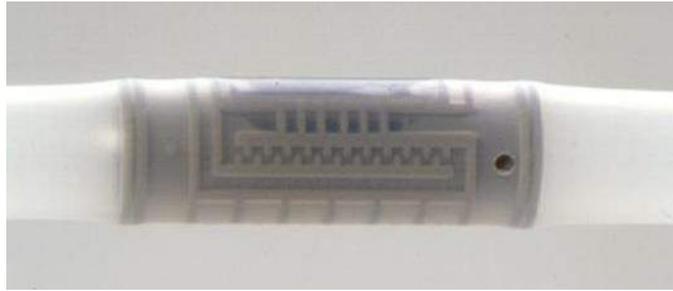


Figura 17. Tubo gotejador com emissor inserido.

São fabricados em diversos espaçamentos entre emissores e vazões diferenciadas. Para paisagismo são mais recomendados os de espaçamento de 20 cm e 30 cm entre emissores. A vazão por emissor pode variar de 1 L h^{-1} a 4 L h^{-1} .

O motivo do pequeno espaçamento está relacionado à densidade de plantio que encontramos em paisagismo o que nos leva a necessitar de menores espaçamentos e também de menores tempos de irrigação.

Dentro destes dois modelos temos também duas variedades básicas: (i) tubos gotejadores para uso aparente, e (ii) tubos gotejadores para uso enterrado.

24.3.9.3 Tubo gotejador para uso aparente

No caso de jardineiras e/ou pequenos maciços podemos utilizar gotejadores regulares, que funcionam com pressões menores, pois é uma situação comum encontrada em pequenos jardins.

O gotejador é uma excelente solução para a irrigação de pequenos espaços, maciços de plantas, plantas isoladas, paredes verdes e vasos. Podemos viabilizar a irrigação em áreas onde jamais poderíamos imaginar antes. Exemplo: irrigação em vasos em um poste.

24.3.9.4 Tubo gotejador para uso enterrado

Em 2010, foi lançado a mais revolucionária tecnologia para utilização de gotejamento enterrado. Se trata de um sistema chamado de "Barreira de Cobre", incorporado ao gotejador. Esta tecnologia patenteada protege os emissores da intrusão de raízes, criando um sistema de longa vida útil e baixa manutenção para os jardins.

Resultando num sistema que não necessita manutenção, uso, ou reposição de produtos químicos para a prevenção a entupimento. Os gotejadores são autocompensantes e o tubo é feito em dupla camada (cor cobre sobre preto), garantindo grande resistência a produtos químicos, crescimento interno de algas e aos danos causados por radiação Ultravioleta.

Como funciona exatamente esta tecnologia? (i) as raízes das plantas exsudam, naturalmente, ácidos orgânicos, que em contato com as placas de cobre dos emissores, liberam íons de cobre, (ii) os íons de cobre ficam localizados na "solução do solo" próximos aos orifícios de saída dos emissores/gotejadores, (iii) esses íons enfraquecem e inibem o crescimento das radículas junto aos emissores, (iv) o cobre não é absorvido pelas radículas e transferido para outras partes das plantas, mantendo-as saudáveis e livres de produtos tóxicos, e (v) tecnologia usada há mais de 10 anos no controle de raízes em diversos outros tipos de aplicações.

Os dados que temos é que assumindo uma média de funcionamento de 45 min dia⁻¹, 4 dias por semana; a expectativa de vida do tubo ultrapassa os 16 anos.



Figura 18. Imagem ilustrativa tubo gotejador para uso enterrado com escudo de cobre.

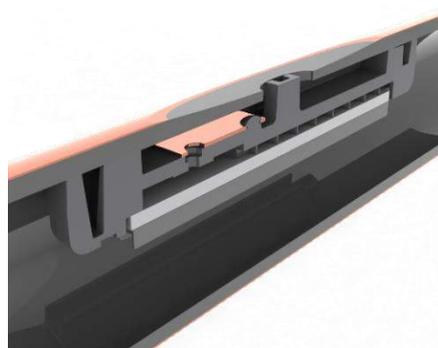


Figura 19. Foto em corte do gotejador com placa de cobre.

24.3.9.5 Borbulhadores e micro-sprays

Agora iremos apresentar os dois mais simpáticos e populares emissores de baixo volume: Os borbulhadores e os micro-sprays.

A água pode cair bem próxima ao emissor ou pode ser aspergida a poucos centímetros na forma de *spray* ao redor, numa forma de “guarda-chuva”. Os borbulhadores podem ser utilizados para irrigar áreas estreitas e de pequenas dimensões e podem ser ajustados para emitir baixas vazões.

São equipamentos que produzem raios bem pequenos. O tipo de borbulhador mais comum tem uma vazão de funcionamento de $0,13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a $0,80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e podem ser utilizados em áreas estreitas e pequenas. Uma de sua principal vantagem é que pode irrigar uma planta específica sem atingir outras que estão próximas.

Os borbulhadores são emissores extremamente versáteis e permitem um grande número de aplicações e modos de instalação. Eles podem ser pontuais e/ou abrangentes, com aplicação principal em jardins pequenos, vasos e jardineiras, podendo irrigar plantas isoladas ou em maciços. Geralmente disponíveis em modelos de 180° e de 360° . Lançam a água na forma de pequenos jatos, com gotas de maior diâmetro que os *sprays*. Ideal para uso em jardineiras suspensas, vasos e pequenos jardins. Possuem raio de alcance e vazões reguláveis. O raio pode ser ajustado de 0 a 80 cm e a vazão de 0 a 49 L h^{-1} (litros por hora).



Figura 20. Imagem de Borbulhadores de respingo e tipo "sombrinha".

Esta regulagem é que permite sua aplicação nos jardins e vasos das mais variadas formas e dimensões. Eles possuem a vantagem de formarem vários bulbos, disponibilizando água para as raízes das plantas.

Os micro-sprays também possuem possibilidade de ajuste de raios e também são versáteis, possuindo as mais diversas aplicações. Podem ser utilizados em pequenos jardins, casas de vegetação, pequenos gramados, pomares e plantios densos. São viáveis em jardins de dimensões maiores de onde são aplicados os borbulhadores, uma vez que possuem maiores raio de alcance (até 4 m) e podem ser instalados com maiores espaçamentos entre emissores.



Figura 21. Micro-spray em funcionamento.

24.4 Válvulas e estações

Fazendo a comparação de válvulas solenoides com o corpo humano elas seriam o coração. Se elas param de funcionar todo o sistema para. A teoria de operação das válvulas é a mesma para todos os fabricantes.

Costumo sempre usar a comparação que as válvulas são iguais impressoras jato de tinta. Não importa o quanto de modelos e aplicações existem, elas sempre possuíram o mesmo princípio mecânico de funcionamento e operação. As diferenças que temos são em resistência, configurações e outros.

A Figura 22 possui o descritivo dos componentes internos de uma válvula.

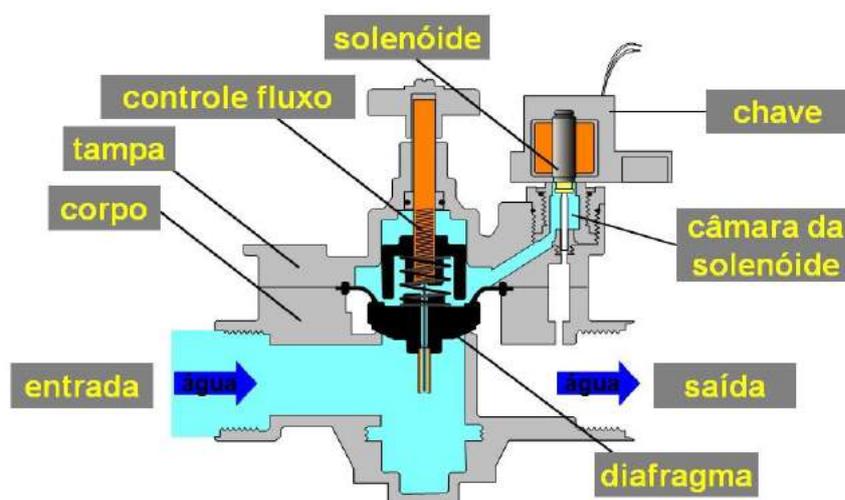


Figura 22. Válvula elétrica e seus componentes.

As válvulas solenóides são nada mais que um registro (torneira) com acionamento automático através de um contato elétrico, enviado por um controlador. A sua operação é simples: o solenóide recebe um contato elétrico e se abre, permitindo que a água se encaminhe aos aspersores.

Elas são responsáveis pela setorização do sistema de irrigação, que é uma decisão muito importante dentro da confecção de um projeto.

Como já apresentado, a divisão em setores é feita com análise em vários itens hidráulicos e paisagísticos.

As válvulas possuem vários tamanhos, dados em polegadas. O tamanho mais comum em projetos de irrigação residencial é o de 1". O que limita o tamanho da válvula é a vazão do projeto, que é a quantidade de água que vai passar em seu interior em um intervalo de tempo. Temos também modelos específicos para trabalhar com diferentes qualidades de água e situações.

A instalação das válvulas deve ser feita dentro de caixas plásticas apropriadas, enterradas de forma que a tampa fique ao mesmo nível do gramado e/ou da superfície do solo, não ferindo a estética do paisagismo implantado.

Outro detalhe é de como fazer a conexão dos fios. Ela tem que ser feita com conectores apropriados e nunca com fitas isolantes.

Um projeto de paisagismo contempla uma série de tipos de plantas diferentes e que, conseqüentemente, exigem diferentes quantidades de água. Outro ponto é o sombreamento. Avaliar a incidência de sol no jardim é importantíssimo, sendo que áreas sombreadas exigem até 30% menos água. Infelizmente, vemos erros grosseiros na escolha de plantas em vários projetos paisagísticos. Portanto, temos a seguinte conclusão e regra básica: jardins a partir de 200 m² de área necessitam de pelo menos dois setores. O importante é frisar bem que estamos falando de jardins residenciais e não de gramados livres, ou seja, desconfie de projetos de irrigação residencial com apenas um setor.

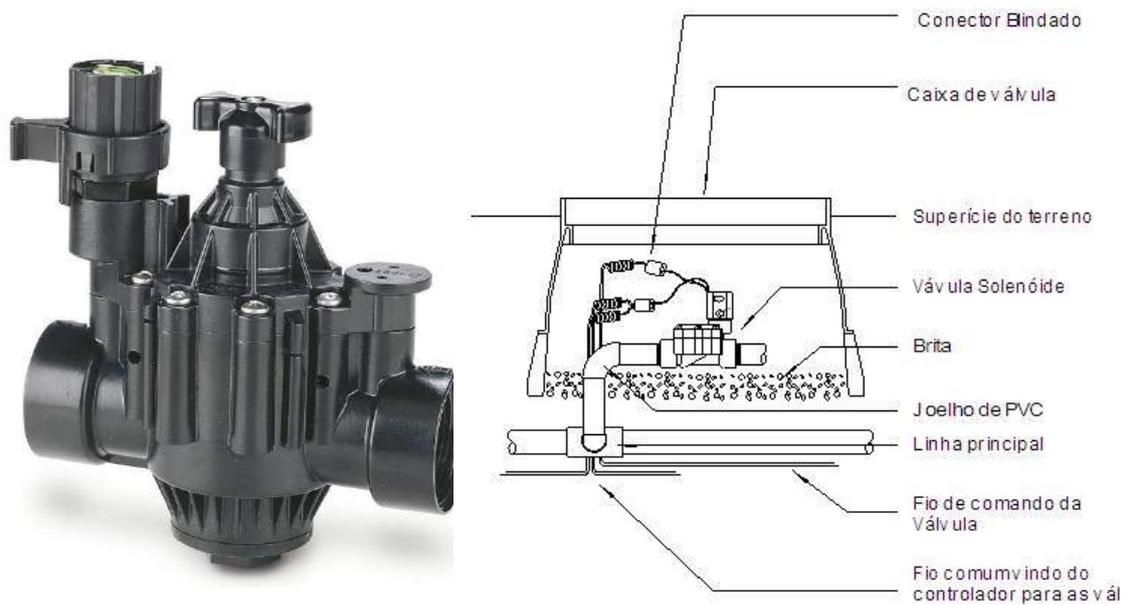


Figura 23. Válvula solenoide e detalhe de sua instalação.

24.5 Automação

24.5.1 Controladores para irrigação

Primeiramente, temos que definir o que é um controlador para irrigação. Ele pode ser definido como um microcomputador, onde programamos o funcionamento da irrigação. Não importa o modelo e marca, pois os controladores possuem, basicamente, a mesma lógica de programação, incluindo: (i) horário no qual queremos que a irrigação seja iniciada, (ii) o tempo de funcionamento de cada setor (válvulas solenoides), (iii) o número de vezes que o sistema deverá funcionar por dia, e (iv) quais os dias da semana em que o sistema deverá funcionar.



Figura 24. Controladores de irrigação.

Geralmente são programáveis por teclas. Os resultados dos comandos selecionados são projetados em uma tela de cristal líquido.

24.5.2 Monitoramento remoto

De forma avassaladora, nos dois últimos anos os telefones celulares se tornaram o principal ponto de conexão das pessoas com o mundo. Hoje, uma pessoa sem um celular inteligente está, literalmente, desconectada do mundo e com limitações de produtividade.

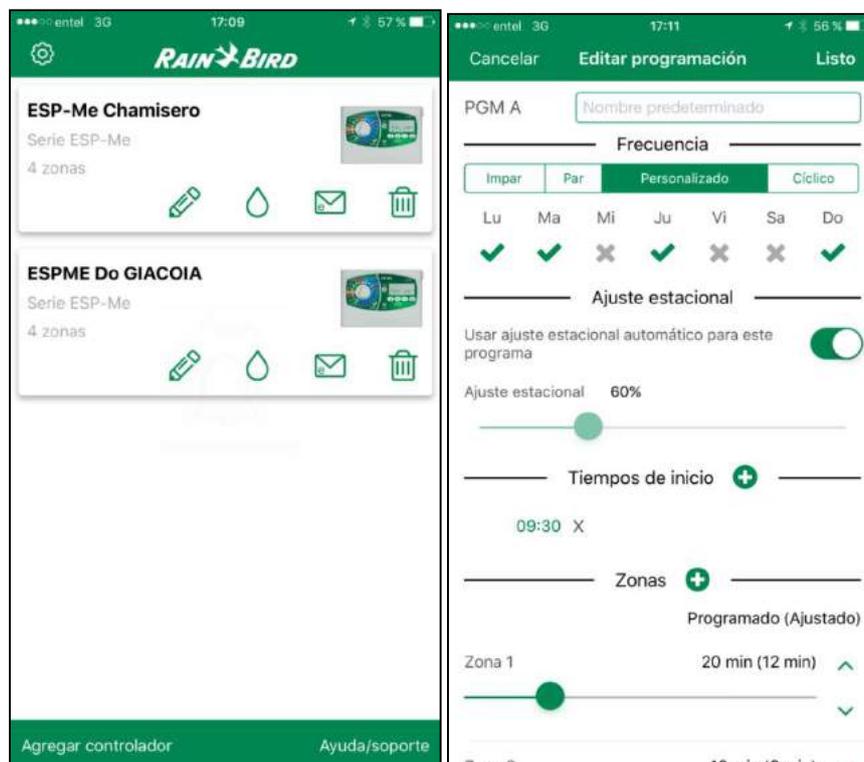


Figura 25. Exemplo da tela de acesso aos controladores e tela de programação de um controlador.

Com essa evolução veio também a avalanche de aplicativos móveis “Apps”, muitos para lazer mas muitos também trazendo controles e ajudando usuários de equipamentos e sistemas a monitorar, controlar, operar, interceder e tomar decisões remotas nas mais diversas áreas. Na irrigação não poderia ser diferente.

Com isso podemos permitir que um técnico de irrigação ou um consultor tenha acesso ao controlador. Podemos solicitar a outras pessoas que operem o sistema se estivermos impossibilitados de fazer o mesmo.

Podemos personalizar o controlador fotos de cada setor para facilidade de identificação e todos o acesso é intuitivo e interativo e o aplicativo guia o usuário em como navegar pela programação do controlador.

O controlador e cada setor podem ser ter nomes para facilitar a identificação de onde e qual é o setor dentro do projeto.

24.5.3 Controles centrais

Um controle central para sistemas de irrigação pode simplesmente ser definido como um sistema computacional que opera múltiplos controladores, sensores e outros dispositivos utilizados em sistemas de irrigação através de único ponto. Os controles centrais de hoje podem monitorar condições dentro de um projeto e então controlar os equipamentos a responder dentro de ações programadas para aquelas condições. Este

monitoramento e controle, permite uma automação completa do sistema de acordo com quaisquer parâmetros definidos para a operação do sistema. O sistema pode operar totalmente sem intervenção humana se programado para tal. Temos como fazer uma grande

A cada ano são incorporadas mais tecnologias e capacidades aos controles centrais.

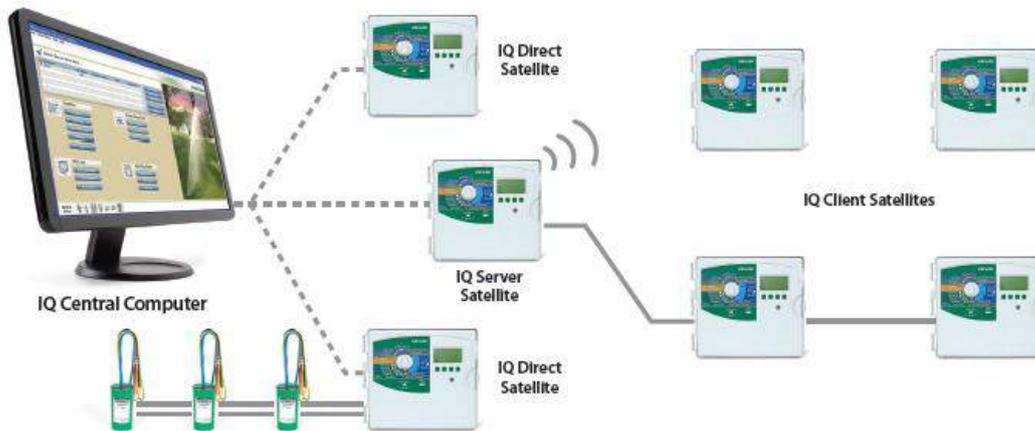


Figura 26. Esquema funcional de controles centrais.

24.6 Considerações finais

O crescimento da construção sustentável exige controles e medições precisas, tomadas de decisão em tempo real e gerenciamento de sistemas.

A tendência da Irrigação paisagística é seguir com o desenvolvimento de emissores eficientes e a automação sofisticada, porém com fácil operação e também mais baixo custo.

Referências

DUBLE, R.L. **Water management on turfgrasses.** Texas Cooperative Extension, 1999.

GIACOIA, J. Projetos e equipamentos de irrigação para Paisagismo. Apostila Módulo IV: **Academia Rain Bird**, Brasil, 2013.

LANDSCAPE IRRIGATION PRODUCTS. 2020 Catalog, Rain Bird, Azusa, 2020.

TURF IRRIGATION DESIGN MANUAL, Rain Bird, Glendora, CA, 1995.

VOIGT, T.; BRANH, B. **Turf water use rates and irrigation management.** Illinois Turfgrass Foundation and University of Illinois Turfgrass Group, 2001.

CAPÍTULO 25

25 SISTEMA IRRIGADO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: HISTÓRIA, MITOS E DESAFIOS

Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira

Resumo

No setor sucroenergético, os termos irrigação e fertirrigação não estão associados ao Sistema Irrigado de Produção, com irrigações ao longo de todo ciclo da cultura, sempre que necessário, mas à prática de distribuir vinhaça e água residuária ou, ainda, ao salvamento – aplicação, imediatamente após a colheita, de uma única lâmina de 40 a 60 mm de água pura, ou com algum grau de mistura com vinhaça e água residuária, visando melhor brotação dos canaviais colhidos no período seco. Nas últimas quatro décadas, sobretudo na última, uma grande transição tecnológica ocorreu no setor sucroenergético. Adicionalmente, houve importante transição geográfica, e a produção que se concentrava no bioma Mata Atlântica migrou gradativamente para o Bioma Cerrado. Entre 1975 e 2015, a área colhida de cana-de-açúcar no Cerrado aumentou de 490 mil hectares para cerca de 5 milhões de hectares, ou seja, de 25% para 49% (BOLFE *et al.*, 2020). Em 2017, mais da metade da produção sucroenergética já estava no Cerrado. Apesar das vantagens que impulsionaram a cana-de-açúcar para o Cerrado, a concentração do período chuvoso em poucos meses e a baixa capacidade de retenção de água de seus solos implicam em baixa chuva efetiva e reduções da evapotranspiração frequentemente superiores a 50% do potencial. As crises hídrica e econômica da última década levaram à falência dezenas de usinas e, dentre as que sobreviveram, acelera-se o interesse e investimentos em sistema irrigado de produção. Apesar disso, o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar ainda não ocupa área expressiva no setor sucroenergético brasileiro. Do universo de quase 400 usinas e destilarias operando no país, menos de 2% possuem alguma fração expressiva e, menos de 1% possuem a maior fração de seus canaviais sob sistema irrigado de produção. No entanto, a acentuação dos efeitos negativos das secas, cada vez mais frequentes e mais severas tem gerado uma grande onda de interesse no sistema irrigado de produção. São inúmeras as vantagens técnicas, sociais, financeiras e ambientais da verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. E não há, por enquanto, nenhum outro novo sistema de produção ou manejo agrônômico que possa trazer, em curto e médio prazo, impactos tão substanciais na lucratividade, competitividade e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro. Por essas razões cresce o consenso de que o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar será, muito em breve, a nova realidade brasileira, ocupando grande fração da área produtiva. Para acelerar o ganho de escala do sistema irrigado de produção no país, duas frentes precisam ser trabalhadas. A primeira diz respeito à desconstrução de alguns mitos e, a segunda, ao avanço da inovação tecnológica para o estabelecimento de premissas e protocolos cada vez mais sólidos para assegurar ganhos de sustentabilidade econômica, social e ambiental para o setor sucroenergético.

25.1 Introdução

Além de explicar o diferente significado dos termos irrigação e fertirrigação no setor sucroenergético, esse capítulo ainda pretende tratar da história do uso da irrigação de cana-de-açúcar no Brasil, e de como a transição tecnológica e geográfica, associada ao

agravamento dos efeitos negativos das mudanças climáticas globais, e de crises hídrica e crises econômica culminaram numa nova tendência – a migração de parte substancial da produção de cana-de-açúcar do Brasil para o sistema irrigado de produção.

25.2 Alinhando conceitos

No setor sucroenergético, os termos irrigação e fertirrigação ganham conotação distinta da utilizada para outras culturas, pois são empregados para distribuição da vinhaça e água residuária, resíduos da indústria, visando fornecimento de nutrientes e solução do passivo ambiental.

No sentido estrito, empregado em outras culturas e lugares do mundo, a irrigação, ou sistema irrigado de produção, significa a alteração do sistema de produção de sequeiro através da redução da deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura, utilizando equipamentos de irrigação para não mais depender exclusivamente da chuva. E, a fertirrigação, diz respeito ao fornecimento fracionado da demanda nutricional da cultura, ao longo do ciclo, utilizando a água da irrigação como veículo para adubação. O objetivo é buscar ganhos de eficiência na absorção de nutrientes, ganhos de produtividade, e redução dos custos de adubação.

Há ainda outro tipo de operação muito característica do setor sucroenergético que, se não for bem compreendida, pode também ser confundida com um sistema irrigado de produção. Essa operação é chamada de **salvamento**.

25.2.1 Irrigação-fertirrigação com vinhaça e água residuária

Os volumes aplicados são calculados, geralmente, em função da necessidade de suprimento anual de potássio. Como resultado, aplica-se uma única lâmina de aproximadamente 15 mm ($150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) imediatamente após a colheita do canavial.

O momento de aplicação da vinhaça e água residuária raramente obedecem a uma lógica de redução do *deficit* hídrico, dado que é definida pela demanda de descarte do resíduo produzido pela indústria, faça chuva ou faça sol. Normalmente, quando se decide por aplicar uma lâmina maior que 15mm, a razão não costuma estar associada à identificação de áreas com maior deficiência hídrica, mas a falhas de gestão ou falta de infraestrutura para distribuição uniforme em maiores áreas. Configuram-se assim as chamadas áreas de sacrifício, que recebem descarte de vinhaça e água residuária em excesso. Hoje a legislação ambiental inibe a existência dessas áreas de sacrifício.

A água que compõe a vinhaça e a água residuária é, majoritariamente, oriunda da própria cana, que é composta por, aproximadamente, 72% de água. Além da água da própria cana, a indústria também capta diretamente de cursos d'água cerca de 0,5 a $1,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de cana processada para uso em seus processos. Os processos de reciclagem e reúso de água na indústria são muito eficientes, com ciclos praticamente fechados, e estão em constante aprimoramento. Ainda assim, a água captada, somada à da própria cana, é alvo de reúso nas lavouras através da distribuição da vinhaça e água residuária.

Visando aumentar a fração de seus canaviais que recebem nutrientes da vinhaça, as usinas têm investido em concentradores de vinhaça e aplicação localizada tratorizada. Como resultado, a área que recebe vinhaça é ampliada. Mas, ao invés de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, os canaviais recebem de 5 a $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, uma fração ainda menor da demanda hídrica da cana, distanciando ainda mais essa prática do conceito intrínseco de irrigação ou sistema irrigado de produção.

25.2.2 Salvamento

Trata-se da aplicação, imediatamente após a colheita, de uma única lâmina de 40 a 60 mm de água pura, ou com algum grau de mistura com vinhaça e água residuária, visando melhor brotação dos canaviais colhidos no período seco. Por isso, o objetivo do salvamento não é fazer a suplementação da deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura e sim garantir seu estabelecimento na fase inicial.

Semelhantemente à aplicação de vinhaça e água residuária, o salvamento é realizado com equipamento de aspersão tipo autopropelido, também chamado de carretel enrolador, e infraestrutura móvel de adutoras e motobombas à diesel.

Comparada à demanda hídrica total de um ciclo de 12 meses da cana, a lâmina de salvamento é maior do que a entregue na aplicação de vinhaça, mas ainda representa menos de 2% da demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado, por exemplo. Portanto, não se deve caracterizar o canavial que recebe salvamento como se estivesse sob sistema irrigado de produção.

25.2.3 Sistema irrigado de produção

No **Sistema Irrigado de Produção**, faz-se a suplementação da chuva com irrigações ao longo do ciclo da cultura visando a redução da deficiência hídrica. Mas é fundamental compreender que o **sistema irrigado de produção** não se trata da simples adição de água sobre um sistema de produção de sequeiro. Aqui, provavelmente, reside a razão de algumas experiências mal sucedidas com irrigação de cana no passado. Quando a água deixa de ser o fator mais limitante da produção, outros fatores assumem essa condição. Por isso, um sistema irrigado de produção propriamente dito, ajusta todos os outros aspectos agronômicos para otimizar e verticalizar a produção. Caso contrário, o padrão agronômico de sequeiro se tornaria limitante para o potencial produtivo da área irrigada.

Sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar podem ser implantados com pivô central (fixo ou rebocável), pivô linear, e gotejamento subsuperficial, sempre buscando redução considerável da deficiência hídrica ao longo do ciclo produtivo.

Atualmente, o sistema irrigado de produção não ocupa fração significativa do setor sucroenergético brasileiro, apesar do crescente interesse. Do universo de quase 400 usinas e destilarias operando no país, menos de 2% possuem alguma fração expressiva e, menos de 1% possuem a maior fração de seus canaviais sob sistema irrigado de produção.

25.3 Transição tecnológica e geográfica para produção irrigada

Por séculos, a produção de cana-de-açúcar brasileira se concentrou nas regiões litorâneas, sobretudo nas várzeas e tabuleiros costeiros da Mata Atlântica, na região Nordeste do Brasil. Entre as décadas de 1930 e 1970, a produção canavieira migrou lentamente para o interior de São Paulo, mas ainda em ambiente de Mata Atlântica (RODRIGUES; ROSS, 2020). Esses ambientes ofertavam disponibilidade hídrica adequada para produção de sequeiro, sobretudo considerando o baixo padrão agronômico e níveis de produtividade almejados à época (ANDRADE, 1958; EISENBERG, 1977; PERRUCCI, 1978; ANDRADE, 2005). Em meados da década de 1950, nos tabuleiros costeiros de Alagoas, a irrigação começou a ser adotada, de maneira ainda modesta, para mitigação da deficiência hídrica em meses secos (ANDRADE, 2005).

Nas décadas de 1960 a 1980, com a expansão da produção para os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, o significado da palavra irrigação no setor passou a se

desviar do objetivo intrínseco da tecnologia – reduzir a deficiência hídrica, passando a significar então a distribuição de vinhaça e água residuária, antes descartados diretamente nos rios (SZMRECSÁNYI, 1988; MELO, 2009).

Entre as décadas de 1970 e 1990, o uso da irrigação em cana-de-açúcar para redução da deficiência hídrica ganhou espaço no Nordeste. Mas isso ocorreu ao mesmo tempo em que o setor iniciava seu declínio na região. Nesse período, apesar da irrigação continuar ganhando espaço, o uso de vinhaça e água residuária já representava a principal razão da utilização dos equipamentos de irrigação na região Nordeste (CARVALHO, 2002).

A partir da década de 1970, nas principais regiões produtoras, o aumento da pressão demográfica causou elevação do custo e da fragmentação das terras em propriedades menores (COSTA; MONDRADO, 2013). Além disso, ciclos de achatamento de margens de lucro de *commodities* e pressão por ganho de escala produtiva e competitividade, motivaram a busca por módulos rurais maiores, menor fragmentação das propriedades, melhor topografia e redução do custo da terra (BACCHI; VALDES, 2013). Ou seja, o cenário econômico e social pressionou a expansão da cana-de-açúcar para ambientes com maior deficiência hídrica e menor fertilidade de solos no Cerrado (VIANNA; SENTELHAS, 2014; MARQUES *et al.*, 2020). Além disso, a partir da década de 1970, o governo federal também vinha implementando programas de incentivo para a produção e ocupação do Cerrado (PIRES, 2000). Por essas razões, gradualmente, e sobretudo na década de 1990, aumentou o interesse de desenvolvimento da agroindústria canavieira na região central do Brasil.

O Cerrado apresenta um clima típico de savana tropical úmida, com estação seca distinta entre abril e outubro e precipitação média anual entre 750 e 2000 mm. Apesar do volume anual de chuvas não ser tão distinto do bioma Mata Atlântica, podendo ser até maior em alguns lugares, sua distribuição é irregular, concentrada majoritariamente entre os meses de novembro e março (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 2002; MARCUZZO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Como na produção de sequeiro, entre eventos de chuva, a planta se sustenta somente através da água armazenada no solo (BERNARDO *et al.*, 2019), o risco de *deficit* hídrico também varia conforme a capacidade de retenção de água de cada solo (VIANNA; SENTELHAS, 2014). No Cerrado os solos são mais intemperizados e, por isso, além dos arenosos, solos com elevado teor de argila, como os ácricos, também apresentam baixa capacidade de retenção de água (PRADO, 2013).

Um conceito muito importante para compreender a maior deficiência hídrica no Cerrado é o de precipitação efetiva (Pef), aquela fração da chuva que é, de fato, absorvida e utilizada pelas plantas (TONELLO *et al.*, 2014). Nesse bioma, o percentual da precipitação que se torna efetiva é pequeno, em virtude da grande concentração da precipitação em poucos meses do ano, resultando numa grande fração dessa chuva que escoia diretamente para rios e lagos, e percola para o lençol freático, abaixo da zona radicular, antes que a planta consiga utilizá-la.

A combinação entre a maior demanda hídrica da planta adulta com os meses mais secos, baixa capacidade de retenção de água dos solos, e baixa Pef, faz do Cerrado um ambiente de *deficit* hídrico limitante para a cana-de-açúcar, com reduções da evapotranspiração frequentemente superiores a 50% do potencial (RODRIGUES *et al.*, 2014).

No início da expansão para o Cerrado, sobretudo para o interior de São Paulo, a migração ocorreu para regiões de transição com Mata Atlântica, onde a distribuição das chuvas e os solos eram semelhantes aos encontrados nessa região (ANDRADE, 1994; VIAN, 2007; RODRIGUES; ROSS, 2020). Contudo, ao final da década de 1990,

intensificou-se a expansão para o interior do Cerrado (FILOSO, 2015; CHERUBIN, 2016). Neste momento, apostava-se que a rusticidade da cana-de-açúcar lhe conferiria o mesmo padrão de desempenho das lavouras em bioma Mata Atlântica, mesmo migrando para regiões de maior deficiência hídrica. A expansão do bioma Mata Atlântica para o bioma Cerrado ocorria com pouco ou nenhum ajuste do sistema de produção para absorver os impactos desse maior *deficit* hídrico. O emprego da irrigação para redução da deficiência hídrica representava uma fração irrisória da área produtiva de cana-de-açúcar no Brasil – uma exceção. E a pesquisa para o desenvolvimento de um sistema de produção irrigado para cana-de-açúcar caminhava no mesmo ritmo.

Na década de 2000, em novo momento de expansão do setor sucroenergético brasileiro, *greenfields* se espalharam aceleradamente pelo Cerrado em um movimento que ainda priorizava a velocidade da expansão em detrimento da qualidade de implantação e manutenção dos canaviais. Logo, os efeitos da maior deficiência hídrica começaram a afetar destacadamente o desempenho do setor sucroenergético brasileiro. A baixa qualidade de operações de implantação, condução e colheita dos canaviais que, ocasionalmente, pelo melhor regime hídrico, ainda permitiam níveis aceitáveis de produtividade e longevidade em ambiente de Mata Atlântica, agora desafiavam a sustentabilidade do setor sucroenergético no Cerrado. A produtividade caía e a longevidade dos canaviais, frequentemente, recuava dos convencionais 6 a 8 cortes em bioma Mata Atlântica para 4, 3, ou até 2 anos. Junto com crises financeiras e os desafios da transição para plantio e colheita mecanizados, a deficiência hídrica resultava em estagnação ou declínio da produtividade média e competitividade do setor sucroenergético nacional (GOUVÊA *et al.*, 2009).

Nesse momento, sobretudo em usinas com maior experiência de produção no Cerrado, intensificou-se o aperfeiçoamento dos projetos de distribuição de vinhaça e água residuária, além da adoção do salvamento. No entanto, ainda eram raras as iniciativas de adoção de sistema irrigado de produção. Por vezes, algumas iniciativas exploratórias de implantação de equipamentos de irrigação em canaviais com manejo agrônomo de sequeiro indicavam potencial de resposta à irrigação. Mas a inexperiência e ausência de tecnologia desenvolvida para sistema irrigado de produção de cana no Brasil conduziam os resultados para ganhos não tão expressivos de produtividade, sobretudo quando contrastados com os custos ainda muito elevados de aquisição dos equipamentos de irrigação.

25.4 Crises hídrica e econômica

Na década de 2010, o Cerrado já representava, aproximadamente, metade da área de cana-de-açúcar brasileira, e o ritmo de expansão nesse bioma ainda é substancialmente superior aos demais. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017; CASTILLO, 2015; GAROFALO *et al.*, 2020). Mas o *deficit* hídrico dessa região tem se agravado com a redução do volume precipitado e o encurtamento da estação chuvosa (MACENA *et al.*, 2009; CAMPOS; CHAVES, 2020). Além disso, há evidências de que as mudanças climáticas globais podem aumentar ainda mais esse *deficit* hídrico para cana-de-açúcar no Cerrado (CARDOZO; SENTELHAS, 2013; SANTOS; SENTELHAS, 2014; DIAS; SENTELHAS, 2019), o que, além de reduzir o potencial produtivo, encurtaria ainda mais a janela adequada de plantio (VIANNA; SENTELHAS, 2014) e elevaria os custos de produção.

Essa intensificação da expansão para o Cerrado e o agravamento do *deficit* hídrico motivaram a Embrapa Cerrados, em 2008, a iniciar seus trabalhos de pesquisa para o setor. Sua ampla experiência em aprimoramento e desenvolvimento de sistemas de produção para o Cerrado, aliado à visão de que havia grande potencial genético não

explorado nas variedades de cana existentes, direcionou os esforços para o aprimoramento e desenvolvimento de novos sistemas de produção de cana para este bioma. Nesse contexto, acreditava-se que não haveria outro fator de produção, além da água, capaz de impactar tão fortemente em médio e longo prazo a verticalização da produção, competitividade e sustentabilidade ambiental da produção sucroenergética brasileira.

A pesquisa para o desenvolvimento de um sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar para o Cerrado brasileiro ganhou força. O interesse e incentivo no setor vinha de alguns poucos produtores de regiões de maior deficiência hídrica do Cerrado, ou que tinham alguma experiência com outras culturas irrigadas, ou mesmo de produtores tradicionais do bioma Mata Atlântica com perfil mais inovador. Mas a maior parte dos produtores ainda se mostravam muito relutantes em acreditar no potencial ou viabilidade econômica da tecnologia. Esse fenômeno é muito semelhante ao identificado nos primórdios da produção irrigada de diversas outras culturas, como café e laranja. Mas, atualmente, são raros os empreendimentos de produção dessas culturas que não são concebidos sob sistema irrigado de produção.

No início, mesmo em instituições de pesquisa, muitas das iniciativas de produção irrigada de cana ainda estavam associadas à simples adição de água sob um sistema de sequeiro, que acabavam por reforçar os resultados economicamente ainda pouco expressivos. Mas também já começavam a surgir alguns resultados que mostravam um potencial muito diferente de tudo que já se havia experimentado no setor.

Após 2013, as crises hídrica e econômica vivenciadas pelo setor levaram à falência dezenas de usinas e, dentre as que sobreviviam, acelerava-se o interesse e investimentos em sistema irrigado de produção. Evidenciava-se que, num horizonte muito próximo, este novo sistema seria considerado uma trajetória tecnológica irreversível. Contudo, a pouca disponibilidade de informação técnica, a incerteza quanto ao futuro político e econômico do Brasil, a dificuldade de acesso ao crédito e, os poucos exemplos de áreas sob o sistema com longo histórico de sucesso, ainda limitavam os investimentos.

25.5 Sistema irrigado de produção: a nova realidade do setor

25.5.1 Potencial e vantagens

São inúmeras as vantagens técnicas, sociais, financeiras e ambientais da verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. E não há, por enquanto, nenhum outro novo sistema de produção ou manejo agrônômico que possa trazer, em curto e médio prazo, impactos tão substanciais na lucratividade, competitividade e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro. Por essa razão cresce o consenso de que o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar será, muito em breve, a nova realidade brasileira, ocupando grande fração da área produtiva.

25.5.1.1 Produtividade

O sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar confere maior produtividade tanto em toneladas de colmo por hectare (TCH) quanto em quilos de açúcar por tonelada de colmo (ATR). Consequentemente, também confere maior produtividade em termos de toneladas de açúcar por hectare (TAH).

25.5.1.2 Longevidade

Um dos principais fatores de redução da produtividade de canaviais está associado à perda de população de colmos (INMAN-BAMBER, 1994), que é resultado, além da deficiência hídrica, do pisoteio, abalo e arranquio de soqueiras, do aumento da infestação de pragas e doenças, do aumento da pressão de ervas-daninhas, e da degradação da fertilidade do solo (MANHÃES *et al.*, 2015).

A longevidade de um canavial é, frequentemente, definida por uma produtividade mínima aceitável (TCH ou TAH). As usinas costumam definir esse patamar mínimo empiricamente, ou com uma matriz de decisão composta exclusivamente de parâmetros técnicos, ou associando parâmetros técnicos com alguma métrica financeira como, por exemplo, fluxo de caixa descontado. A produtividade mínima aceitável também oscila em função da capacidade financeira para custear a reforma e do custo de oportunidade de deixar uma área sem produção, mesmo que baixa, em ano de bom preço do açúcar e álcool. Mesmo quando se decide o momento de renovação do canavial através de uma matriz de decisão multivariada, a produtividade atual e a produtividade potencial, caso o canavial fosse renovado, sempre tem grande peso na decisão.

Em uma usina com nível de produtividade inferior, esse limite pode ser um TCH de 40 ou 50. Já nos melhores canaviais do país a produtividade mínima aceitável pode ser um TCH de 80 ou 90. Contudo, todas essas referências têm como base um canavial de sequeiro. Se mantivermos esses mesmos níveis para áreas irrigadas, certamente a longevidade do canavial irrigado aumentará substancialmente. Primeiramente, porque, comparado às áreas de sequeiro, a melhor condição hídrica e nutricional do canavial irrigado favorecerá a rebrota e reduzirá suas falhas (RUIZ-CORRÊA *et al.*, 2013; CAMPOS *et al.*, 2014; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014). Segundo, porque, sob condição irrigada, a fração dos perfilhos que se tornam colmos é superior (ALMEIDA *et al.*, 2008). Ou seja, a melhor condição hídrica e nutricional de um canavial sob sistema irrigado mantém maior população de colmos e o declínio populacional ao longo dos anos é desacelerado em comparação com o canavial de sequeiro. Além de maior população de colmos, o sistema irrigado oferece melhores condições para o crescimento desses colmos ao longo do ciclo (DIAS; SENTELHAS, 2019). Finalmente, diante da ocorrência de falhas, o sistema irrigado permite que a touceira imediatamente ao lado da falha explore melhor a radiação adicional disponível e reduza o impacto da falha adjacente.

Contudo, ao observarmos o sistema irrigado de produção como um negócio individualizado, e analisarmos seu fluxo de caixa, percebemos que haverá um grande custo de oportunidade se aguardarmos de 12 a 15 anos para que uma área irrigada atinja as mesmas produtividades mínimas estabelecidas como referência de reforma para uma área de sequeiro.

Por exemplo, considere que a produtividade de colmos de uma área irrigada atingiu, após alguns ciclos, 110 t ha^{-1} . Será mais interessante, financeiramente, aguardar mais alguns anos para que essa produtividade chegue a 80 t ha^{-1} determinada como ponto de reforma para uma área de sequeiro? Ou será melhor renovar o canavial e retornar à produtividade dessa área para patamares acima de 200 t ha^{-1} ? Enquanto negócio, qual seria a melhor estratégia? E se considerarmos que a vida útil de equipamentos de irrigação, com boas práticas de manutenção, pode atender a dois ou três ciclos de 8 a 10 anos mesmo no gotejamento, pode-se optar por trocar apenas as linhas gotejadoras em dois ou três ciclos, dado que representam, aproximadamente, 30% do custo de um sistema novo e, com a troca, poderá operar por mais dois ou três ciclos de 10 anos.

Enfim, comparado a um sistema de sequeiro, é fato que a longevidade do canavial irrigado é maior. Mas enquanto estratégia de negócio, acreditamos que, financeiramente, poderá ser mais interessante estabelecer uma produtividade mínima aceitável mais elevada para o canavial irrigado. Na prática, isso pode significar um aumento de longevidade ligeiramente menor do que os 12 a 15 anos comumente preconizados.

25.5.1.3 Renovação de canavial

O aumento da longevidade do canavial reduz o percentual da área que precisa ser renovada anualmente, reduzindo o tamanho da infraestrutura de preparo de solo e plantio, seja da frota de máquinas, de mudas, insumos, ou de mão-de-obra. Adicionalmente, a renovação anual de uma área menor reduz significativamente o risco de plantios mal conduzidos e fora da janela climática ótima, que impactam negativamente a produtividade e longevidade de todo o ciclo do canavial.

25.5.1.4 Janela de operações

A qualidade e custo de diversas operações agrícolas dependem da umidade do ar e solo. No Cerrado, a janela ideal para plantio em sistema de produção de sequeiro ocorre apenas no mês de março. A estreita janela de plantio também reduz a janela de preparo do solo. Ainda assim, o plantio acaba não se restringindo à janela ideal. Isso ocorre porque, para viabilizar o plantio em toda a área necessária em apenas 30 dias, seria preciso um investimento substancialmente elevado de mão-de-obra e maquinário. Como consequência, abre-se a janela de plantio para os meses que antecedem e sucedem março, assumindo impacto negativo na qualidade do plantio, produtividade e longevidade da área.

Plantios realizados antes de março resultam em um canavial chegando no período seco com muita biomassa para ser sustentada. Como não haverá disponibilidade hídrica suficiente, esse canavial sofrerá com a seca. Plantios realizados depois de março correm o risco de não receberem chuva suficiente para germinação e estabelecimento adequado da população de colmos, também comprometendo permanentemente a produtividade e longevidade da área.

A janela estreita de plantio também dificulta o uso de rotação de culturas como a soja, sobretudo em canaviais colhidos no final de safra. Ou limita a utilização de variedades de soja muito precoces, com potencial de produção inferior. Frequentemente se abre mão do uso de cultura de rotação temendo atrasar o plantio e sofrer as consequências permanentes de uma germinação ruim da cana que sucede a soja.

Quando sob sistema irrigado de produção, não há limitação de janelas de preparo e plantio ocasionada por deficiência hídrica. Pode-se irrigar para elevar a umidade do solo para condições adequadas de preparo e plantio. Ou seja, pode-se plantar durante todo o ano. Com isso, ganha-se por diminuir a demanda de maquinário e mão-de-obra, ampliando a janela de plantio, e ganha-se na qualidade do plantio, gerando ganhos adicionais de produtividade e longevidade.

O sistema irrigado de produção também oferece vantagens nas janelas de operações de tratamentos culturais que demandam condição adequada de umidade do solo ou dossel, como herbicidas, adubação, inseticidas, etc. Esse sistema de produção também estende o período de colheita, dado que possibilita planejar e manejar água, nutrientes e maturadores para entregar, já em março, níveis mais elevados de TCH e ATR. Adicionalmente, por não depender exclusivamente da oferta de chuva, usinas que dispõem de boa fração de sua área sob sistema irrigado não precisam reduzir

demasiadamente a fração de área colhida nos períodos de maior deficiência hídrica, dado que a irrigação garantirá excelente brotação após a colheita.

25.5.1.5 Tratos fitossanitários

Quanto maior a produtividade da área, menores serão os custos operacionais (Opex) e de capital (Capex) de operações agrícolas por tonelada de cana produzida.

Para executar operações de preparo de solo, adubação e tratos fitossanitários em uma determinada área e em determinada janela de tempo, a distância percorrida e a quantidade de maquinário necessária não serão afetadas pela produtividade que a área entregará. Portanto, aumentar a produtividade significa diluir esses custos por tonelada de cana produzida.

25.5.1.6 Colheita, transbordamento e transporte

Os custos de corte, transbordamento e transporte (CTT) são substancialmente reduzidos no sistema irrigado de produção. Apesar da tecnologia atual das colhedoras não permitir operar com a mesma velocidade nos canaviais irrigados, a quantidade de cana colhida por hora em áreas de alta produtividade aumenta, reduzindo o custo de corte por tonelada de colmo ou de açúcar (MACHADO *et al.*, 2002; YADAV *et al.*, 2003; CAMPOS *et al.*, 2017). Com a evolução das colhedoras, essa vantagem em canavial irrigado só aumentará. Além disso, por causa da maior produtividade de TAH, a distância que se caminha com os transbordos para receber cada tonelada de ATR diminui. Consequentemente, diminui-se o custo de transbordamento por tonelada de colmo ou de açúcar. Finalmente, a maior produtividade do sistema irrigado, permite verticalizar a produção da usina como um todo, e atender à moagem com menor área de cana plantada, menor raio médio e maior proximidade à usina. Dessa forma, haverá redução do custo por tonelada de colmo ou de açúcar transportado. Ou seja, a verticalização das áreas com sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar resulta na redução acentuada de um dos principais custos do setor, o CTT.

25.5.1.7 Custo de insumos

O custo de diversos insumos está associado à área plantada, e não a produtividade. Por exemplo, o custo com herbicidas não aumenta proporcionalmente à produtividade. Ao contrário, áreas sob sistema irrigado, pelo menor índice de falhas, maior cobertura de palha e maior velocidade de crescimento e sombreamento da entrelinha, possuem menor pressão de ervas-daninhas. Custos com monitoramento de pragas e doenças, inibidores de florescimento, corretivos, maturadores e diversos outros insumos são pouco ou nada influenciados pela produtividade do canavial. Dessa forma, aumentar a produtividade da área reduz o custo por tonelada de colmo e açúcar. Ainda, em função do ganho de eficiência de absorção de nutrientes em áreas sob sistema irrigado, também poderá haver redução adicional da demanda de fertilizantes por tonelada de colmo e açúcar.

25.5.1.8 Palhada

A produção de palha é proporcional à produtividade de colmos (BUFON *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020). Um sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar pode produzir até 40 t ha⁻¹ (base seca) de palha, ao passo que uma área sob produção de sequeiro produz de 5 a 10 t ha⁻¹ (BUFON *et al.*, 2016). A maior cobertura de palha do sistema irrigado de produção impacta diretamente na redução de

evaporação da água do solo, reduzindo a demanda hídrica da cultura ao longo do ciclo (OLIVER; SINGELS, 2007; BUFON *et al.*, 2016; NG CHEONG; TEELUCK, 2016; CARVALHO *et al.*, 2019). Essa maior quantidade de palha, concomitante à maior velocidade de decomposição do palhicho sob condição irrigada (BARBOSA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020) também aumenta a disponibilidade de matéria orgânica do solo. Mais matéria orgânica também implica em maior atividade e qualidade biológica do solo (MENDES *et al.*, 2020). O maior volume de palha também aumenta a proteção do solo, reduzindo além dos efeitos erosivos da chuva, a lixiviação de nutrientes e a perda de água para além do sistema radicular (SÁ *et al.*, 2015). Por aumentar a micro rugosidade da superfície do solo e retardar o escoamento superficial, o maior volume de palha da produção irrigada também melhora a infiltração de água, melhorando o aproveitamento da chuva e reduzindo o *deficit* hídrico (BUFON *et al.*, 2016; SATIRO *et al.*, 2017). Considerando que, pelo menos, 5 a 8 t ha⁻¹ (base seca) da palhada devem ser mantidas sobre a superfície para garantir boa conservação, infiltração e redução da evaporação de água do solo (SÁ *et al.*, 2015; CASTIONI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018), quanto maior a produtividade de palha, maior o percentual que poderá ser recolhido para produção de energia elétrica ou etanol de segunda geração.

25.5.1.9 Demanda e custo da terra

A verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção reduz a quantidade de terra necessária para atender a capacidade instalada de moagem da usina. Como resultado, ganha-se com a redução do raio médio.

Por isso, ao investir no sistema irrigado, a usina pode abrir mão de suas áreas mais distantes e de solos com menor fertilidade e capacidade de armazenamento de água. Da fração restante, a usina ainda pode direcionar solos e janelas de plantio e colheita mais restritivos para o sistema irrigado, dado que a oferta de nutrientes e água não é limitação para esse sistema. E por fim, direcionar os melhores solos e janelas de plantio e colheita para o sistema de produção de sequeiro. Ou seja, o investimento em produção irrigada gera impacto indireto, mas substancial no custo, produtividade e longevidade da área de sequeiro, abrindo ainda mais espaço para a redução de áreas e custo da terra para atender a moagem da usina.

A redução da demanda por terra também gera a oportunidade de abrir mão das áreas mais declivosas e recortadas, o que confere maior eficiência operacional e menor custo com maquinário. Favorece ainda, o atendimento da moagem da usina com menor número de fornecedores e arrendatários, reduzindo o custo de gestão de contratos e risco de litígio.

Esse efeito “poupa terra” do sistema irrigado de produção que se estende indiretamente para as áreas de sequeiro gera ainda um efeito formidável na sustentabilidade ambiental do setor sucroenergético, dado que também reduz a pressão de expansão de área plantada de cana sob áreas de grãos, pastagem ou de vegetação nativa. O ganho de eficiência ambiental também pode ser convertido em aumento das receitas com a venda de mais CBIOS - créditos de carbono (KLEIN *et al.*, 2019), com a manutenção e ganho de mercados através de novas e melhores certificações ambientais. E ainda pode reduzir os custos de investimento e manutenção de áreas de preservação permanente e reserva legal.

25.5.1.10 Quebra de safra e previsibilidade de produção

Uma característica intrínseca da agricultura é o risco da dependência das condições climáticas (GOUVÊA *et al.*, 2009; SANTOS; SENTELHAS, 2014;

SILALERTRUKSA; GHEEWALA, 2018; CAMBRAIA NETO *et al.*, 2021). A quebra de safra por questões climáticas, além da redução de margem de lucro na safra corrente, gera impactos na brotação e no custeio da lavoura do ano seguinte, impactando a população de plantas e a produtividade da próxima safra e de todos os anos vindouros, reduzindo a longevidade do canavial.

A vulnerabilidade climática ainda eleva o custo dos seguros e dificulta o cumprimento de contratos de empréstimo, arrendamento, venda de açúcar e etanol, energia elétrica, pagamento de fornecedores, etc. O risco climático ainda atinge a fração da produção que pode ser pré-comercializada com segurança, e eleva o custo de compra de cana no mercado *spot*. Por conseguinte, afeta o reinvestimento na renovação e modernização dos canaviais, frota, indústria, etc. Ou seja, desmobiliza e inibe os investimentos no setor, comprometendo não só seu crescimento, mas também sua competitividade e sustentabilidade.

Por outro lado, a menor vulnerabilidade climática do sistema irrigado, além de mitigar os aspectos acima, aumenta a probabilidade do cumprimento de metas e favorece o ambiente de trabalho e de negócio, gerando um ciclo virtuoso de motivação e dedicação da equipe, além de ser mais atraente para os melhores profissionais do mercado.

Ademais, a quebra de safra por razões climáticas em determinado ano é um fenômeno que, via de regra, impacta não somente uma única usina, mas o setor como um todo. Isso gera quebra de oferta que, então, exerce pressão sobre os preços e acaba se tornando uma oportunidade para ganho de *Market share* e competitividade das usinas que se diferenciam com sistema irrigado. Ou seja, no momento de crise climática, além de reduzirem sua vulnerabilidade, usinas com sistema irrigado de produção ampliam sua vantagem competitiva de forma mais acelerada e acentuada.

E as incertezas trazidas pelas mudanças climáticas ainda exacerbam essa vantagem do sistema irrigado. Vários prognósticos apontam para maior probabilidade de cenários de maior deficiência hídrica no Cerrado, trazendo eventos de seca cada vez mais frequentes e mais intensos (SANTOS; SENTELHAS, 2014; DIAS; SENTELHAS, 2019). Por essa razão, lastrear pelo menos uma fração da produção sob sistema irrigado tem um impacto que vai muito além do retorno direto de produtividade da área específica. E isso é ainda mais relevante para a sobrevivência dos empreendimentos em *commodities*, que mesmo passando por ciclos de alta e baixa de preços, permanecem com a tendência de achatamento de margem (CASHIN *et al.*, 2002; KABLAN *et al.*, 2017).

25.5.2 Desafios para o ganho de escala

Para acelerar o ganho de escala do sistema irrigado de produção no país, duas frentes precisam ser trabalhadas. A primeira diz respeito à **desconstrução de alguns mitos** e, a segunda, ao **avanço da inovação tecnológica** para o estabelecimento de premissas e protocolos cada vez mais sólidos para assegurar ganhos de sustentabilidade econômica, social e ambiental para o setor sucroenergético.

25.5.2.1 Superar mitos

25.5.2.1.1 Mito: cana-de-açúcar é rústica e não precisa de muita água ou irrigação para sobreviver

O objetivo da produção comercial não é a mera sobrevivência da planta. Ao contrário, um sistema de produção sustentável precisa oferecer condições para que a

cultura entregue o melhor de seu potencial genético e seja o mais eficiente possível. Nesse sentido, a afirmação acima é um grande mito.

Seguindo a lógica da Lei dos Mínimos de Liebig (KREUZ *et al.*, 1995), o fator de produção mais restritivo pode não ser a água em um contexto de baixíssimo aprimoramento tecnológico e de gestão. Mas a realidade do setor sucroenergético nacional é muito diferente daquela de 40, 50 anos atrás. É evidente o aprimoramento do manejo varietal, da fertilidade dos solos, de ervas-daninhas, fitossanitário, e do melhor domínio do plantio e colheita mecanizados, além de tantos outros aprimoramentos tecnológicos e gerenciais.

Com o aprimoramento do manejo agrônômico, migração da produção para o Cerrado, e mudanças climáticas que geram eventos de seca mais frequentes e mais intensos, a água, que já era o principal fator de produção, passou a ganhar ainda mais relevância. Por essas razões, é um mito dizer que a cana-de-açúcar, por ser uma planta rústica, não precisa de irrigação.

25.5.2.1.2 Mito: Cana sob sistema irrigado consome mais água do que em sequeiro

É mais apropriado substituir a palavra consumo pela palavra uso. O consumo traz uma visão equivocada de que a água que passa pelo interior da planta é permanentemente perdida, desaparece do sistema hídrico (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2018; SANTIAGO *et al.*, 2018).

E é um equívoco concluir que a cana-de-açúcar em sistema irrigado, por utilizar água proveniente dos cursos d'água, usa mais água que uma cana de sequeiro. A cana de sequeiro também precisa de água para sobreviver e produzir. Como qualquer outra planta, ela absorve parte da água da chuva com suas raízes, transportando-a através de seus colmos até chegar às folhas, de onde é liberada na atmosfera pela transpiração. Nesse aspecto, a cana irrigada é idêntica à de sequeiro, mas, além da água da chuva, também transpira a água que lhe foi entregue pela irrigação no período de seca.

A cana irrigada, por sofrer menor estresse hídrico e nutricional, consegue produzir mais colmos com cada gota de água que utiliza e extrair mais de seu potencial genético (BUFON *et al.*, 2016). Por isso, para uma visão mais holística sobre esse aspecto, precisamos utilizar o conceito de eficiência de uso da água, ou produtividade da água (PA). Num contexto mais amplo, a PA é o retorno líquido por unidade de água utilizada. Na produção agrícola, melhorar a PA requer aumentar a produção de alimentos, energia e fibra, o retorno financeiro, a qualidade de vida e os serviços ambientais com menor quantidade de água.

Como a demanda de cana-de-açúcar não é regida pelo setor sucroenergético, mas pelo mercado consumidor, seu modo de vida e sua demanda por alimento, energia, etc., o que cabe ao setor sucroenergético é responder como será produzida essa cana, com que níveis de eficiência e sustentabilidade.

Como será detalhado mais adiante, a cana irrigada usa menos água para produzir cada tonelada de colmos, açúcar, etanol, etc. Por isso, se o setor sucroenergético atender 20, 40 ou 60% da demanda anual de cana-de-açúcar sob sistema irrigado, no final das contas, a necessidade de água e terra para atender a demanda anual do mercado, na verdade, reduzirá.

25.5.2.1.3 Mito: Irrigar cana-de-açúcar é uma agressão ao meio ambiente

Trata-se de outro grande mito. O sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, como qualquer outro, deve obedecer às melhores práticas de sustentabilidade

e atender rigorosamente às legislações ambientais. O mandato do produtor não é mais, simplesmente, produzir. Mas produzir com sustentabilidade ambiental e social, e sob práticas de governança que atendam os novos anseios e paradigmas da sociedade.

Com relação à sustentabilidade do uso da água, isso inclui utilizar exclusivamente água outorgada. A outorga é concedida com base no histórico de vazões do manancial, garantindo que a maior fração permanecerá intacta, preservando a vida do ecossistema (PINTO *et al.*, 2016). Para tal, é crucial uma gestão responsável dos recursos hídricos pelos órgãos públicos e a participação efetiva, cooperativa e harmoniosa dos usuários nos comitês de bacia.

Para análise técnica e racional do uso sustentável da água no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, é fundamental compreender os seguintes fatores: (i) a água utilizada por toda agricultura irrigada do Brasil representa menos de 0,6% do que existe em nossos rios (CAMBRAIA NETO *et al.*, 2021); (ii) o Brasil possui umas das legislações de água mais modernas do mundo (Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997); e, (iii) é possível gerar grandes impactos positivos ao disponibilizar para a produção irrigada, de forma sustentável, uma pequena fração da vazão outorgável ainda disponível em muitas regiões do Brasil e do Cerrado, e isso só depende de gestão técnica e responsável, focada na sustentabilidade ambiental.

O fato é que o sistema irrigado é uma oportunidade para o Brasil e o setor sucroenergético reduzirem a quantidade de água hoje utilizada para atender a demanda do mercado por cana-de-açúcar, açúcar, etanol, energia elétrica, etc.

Com relação à sustentabilidade do uso da terra, o ganho de eficiência promovido pelo sistema irrigado implica em verticalização da produção, ou seja, produz-se mais em menor área. Com isso, a quantidade de terra necessária para atender a demanda de cana-de-açúcar poderia ser substancialmente reduzida, sobrando terra para ser destinada a outros usos, inclusive para preservação de vegetação nativa. Ademais, a verticalização através do ganho de eficiência, que gera um efeito "poupa-terra", tem sido uma marca da agricultura brasileira (SCARPARE *et al.*, 2016; VIEIRA FILHO, 2016; RESENDE *et al.*, 2021).

E quando adotada sob os conceitos modernos de irrigação deficitária (ou irrigação por *deficit* controlado) e utilizando exclusivamente a disponibilidade hídrica outorgável, a produção irrigada é mundialmente reconhecida com uma das melhores alternativas para o aumento da sustentabilidade ambiental e do uso racional da água, sobretudo no contexto das mudanças climáticas (FERERRES; SORIANO, 2006; GEETS; RAES, 2009; MOLDEN *et al.*, 2010; PATLE *et al.*, 2019; KIJNE *et al.*, 2020; MALHI *et al.*, 2021; GIORDANO *et al.*, 2021). Por essas razões e diversas outras já citadas anteriormente, sistemas irrigados de produção mais modernos, eficientes, verticalizados e racionalmente conduzidos, podem propiciar maior sustentabilidade ambiental do que a produção de sequeiro.

25.5.2.1.4 Mito: Produzir em sistema irrigado é adicionar água ao sistema de sequeiro

Definitivamente, trata-se de outro grande mito. A produção irrigada possui dinâmica e práticas bem distintas das de sequeiro. A mera adição de água a um sistema de sequeiro sem ajustes na escolha de variedades, nutrição, tratamentos fitossanitários, maturação, logística e outros fatores, jamais permitirá extrair o potencial do sistema irrigado. Portanto, um sistema irrigado de produção não se resume à adição de água a um sistema de sequeiro.

25.5.2.2 Avançar no desenvolvimento tecnológico

Além de desconstruir gradativamente os mitos sobre o sistema irrigado de cana-de-açúcar, também é fundamental o desenvolvimento tecnológico, das premissas, protocolos, etc. Vejamos algumas demandas de ajuste tecnológico para produção eficiente sob sistema irrigado de produção.

25.5.2.2.1 Variedades para produção irrigada

Os programas de melhoramento de cana-de-açúcar no Brasil conseguiram incorporar importante potencial produtivo às novas variedades, sobretudo para os ambientes edafoclimáticos com maior deficiência hídrica. Como a produção brasileira ocorre majoritariamente sob sistema de sequeiro, as variedades que se destacam nas usinas são as que conferem maior tolerância à seca. Consequentemente, essas se tornam os futuros parentais para os próximos cruzamentos. Como resultado, após décadas de melhoramento genético selecionando variedades com maior tolerância à seca, corre-se o risco de estreitamento da base genética para materiais com essa característica. Ocorre que esse padrão genético frequentemente é antagônico aos padrões genéticos de responsividade à irrigação (CARVALHO; FURTADO, 2013; MORAIS *et al.*, 2015). Por exemplo, frequentemente, as variedades mais responsivas ao aumento da oferta hídrica são aquelas que, sob aumento do *deficit* de pressão de vapor, são menos sensíveis ao fechamento estomatal, retardam a senescência foliar e enrolamento de folhas, etc. E essas são justamente algumas das características desejáveis para conferir maior tolerância à seca.

Atualmente, nenhum programa de melhoramento brasileiro declara oficialmente possuir um programa específico para o sistema irrigado de produção. São conhecidas, contudo, algumas iniciativas que buscam identificar características desejáveis para produção irrigada. Por vezes, isso é realizado através da alocação de *seedlings* sob áreas irrigadas. Mas não necessariamente em áreas cuja lâmina de projeto, manejo da irrigação e manejo agrônômico estejam ajustados segundo as melhores técnicas para sistema irrigado de alto padrão. Assim, o potencial de resposta dos materiais é limitado. O fato dessas iniciativas também não possuírem a mesma envergadura e repetibilidade dos programas para variedades de sequeiro reduz a eficiência e eficácia da seleção.

Se por um lado o sistema irrigado de produção ainda não possui área relevante se comparado à produção de sequeiro, por outro, a ausência de programas fortes de seleção de variedades para área irrigada traz desafios ainda maiores para o ganho de desempenho e relevância para área irrigada.

A alternativa que tem sido adotada pelos produtores é, com base em conhecimento tácito e empírico, tentar identificar dentre as variedades de sequeiro aquelas que, talvez, possam apresentar bom desempenho sob sistema irrigado. Mas, mesmo os produtores com maior experiência em sistema irrigado relatam a dificuldade de conferir longevidade com elevados patamares de produção utilizando as variedades de sequeiro. E após longo período de análise pelo método de "tentativa e erro", a recomendação de variedades mais adequadas à produção irrigada acontece quando uma enormidade de novas variedades já está disponível para produção de sequeiro.

Algumas das características mais desejáveis para seleção de variedades adaptadas ao sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar são: (i) responsividade acentuada de TAH ao aumento da satisfação hídrica; (ii) manutenção de elevadas taxas de condutância estomática e transpiração sob condições de elevado *deficit* de pressão de vapor; (iii) velocidade de crescimento inicial para fechamento mais rápido da entrelinha e aumento da eficiência de uso de radiação; (iv) porte ereto de colmos; (v)

resistência ao acamamento; (vi) resistência ao arranquio de soqueira; (vii) resistência ao enraizamento e brotação lateral após acamamento; e, (viii) tolerância à doenças que se beneficiam do microclima mais úmido.

A responsividade acentuada de uma variedade ao aumento da satisfação hídrica, por exemplo, não é suficiente para sua indicação ao sistema irrigado se, por exemplo, as demais características não lhe conferem capacidade de manutenção das elevadas produtividades por 10-12 anos. Algumas variedades produzem acima de 250 t ha⁻¹ no primeiro ano, mas em razão do tombamento e enraizamento precoce, além da suscetibilidade ao arranquio de soqueira e doenças fúngicas, têm desempenho abaixo de 130 t ha⁻¹ já no segundo ou terceiro ano. Por outro lado, variedades com elevada tolerância ao acamamento, porte ereto de colmos e boa longevidade, mas que não entregam responsividade acentuada de TAH sob aumento da satisfação hídrica, também não são indicadas para o sistema irrigado de produção.

25.5.2.2.2 Manejo nutricional

Perfil do solo: Um dos paradigmas mais importantes para serem ajustados do sistema de sequeiro para o sistema irrigado diz respeito à construção de um perfil de solo apto para suportar uma elevada produtividade por 10-12 anos, sem necessidade de operações que impliquem em movimentação de solo e, conseqüentemente, renovação precoce do canavial.

Se no sistema de sequeiro podemos incorporar corretivos e matéria orgânica em profundidade, e utilizar cultura de rotação a cada 5-6 anos. Por ocasião da renovação, no sistema irrigado essa janela de intervenção só ocorrerá depois de 10-12 anos. Ou seja, a janela de oportunidade de construir esse perfil diferenciado ocorre exclusivamente na implantação ou renovação da área. Se essa janela não for bem planejada e aproveitada, os impactos negativos na produção só acabarão após 12 anos.

Outro aspecto a ser considerado na construção do perfil do solo é que a adequação do nível de disponibilidade de nutrientes tem a ver com seu valor de mercado, mas também com a intensificação do sistema produtivo. Ou seja, quanto mais verticalizado o sistema, mais rigoroso deve ser o critério de nível de disponibilidade de nutrientes.

Por isso, todas as práticas agronômicas que demandam movimentação de solo, como o uso de cultura de rotação, incorporação profunda de matéria orgânica, calcário, fósforo e micronutrientes devem ser ajustadas para o sistema irrigado de produção.

Fosfatagem: Para produção de sequeiro, recomenda-se elevar a disponibilidade inicial de fósforo no solo para níveis que atendam de 70 a 80% do potencial produtivo, algo próximo a 15 ppm (resina) (REIN *et al.*, 2016). Para sistema irrigado corrigimos esse nível para, pelo menos, 25 ppm de fósforo (resina), segundo método descrito em Rein *et al.* (2016).

Correção da acidez de subsuperfície: A cana-de-açúcar é menos afetada pela acidez do solo do que pela deficiência de cálcio e magnésio, ou presença de alumínio. Correções de acidez na implantação ou renovação do canavial para elevar o percentual de saturação por bases (V) para 50% atendem a grande maioria das áreas de sequeiro (SOUSA *et al.*, 2015). Contudo, para sistema irrigado de produção, recomenda-se calagem com incorporação profunda para elevar o solo a 70% de saturação de bases. Ademais, recomenda-se correções anuais com calcário em dose equivalente ao poder de acidificação do fertilizante nitrogenado utilizado, com aplicação a lanço, na superfície, como forma de manter o solo corrigido por mais tempo.

Por ocasião da implantação do canavial ou reforma, recomenda-se o uso do gesso, aplicado a lanço na superfície, em área total, conforme metodologia de cálculo proposta por Sousa *et al.* (2015). Também se recomenda que, anualmente, pequenas doses de gesso sejam aplicadas na superfície como fonte suplementar de cálcio, magnésio e enxofre.

Correção de micronutrientes: Por ocasião do preparo de solo, também recomenda-se realizar a correção de micronutrientes (SOUSA; LOBATO, 2004). Essa prática não eliminará completamente a necessidade de futuras adubações foliares com micronutrientes. Mas, certamente, essa correção de micronutrientes no solo evitará custos elevados com aplicação de micro via foliar.

Matéria orgânica e atividade biológica: A incorporação de matéria orgânica em profundidade e o uso de cultura de rotação, por vezes, é deixada de lado em áreas de sequeiro em função de alguma dificuldade logística, falha de planejamento, etc. Considerando o peso que a matéria orgânica e a atividade biológica têm na capacidade do perfil do solo de sustentar elevadas produtividades por muitos anos, essas práticas não podem ser negligenciadas. É encorajado o uso das técnicas mais modernas de rotação, inclusive, se possível, adotando mix de fabáceas (leguminosas). A inclusão de poáceas (gramíneas) do gênero *Brachiaria* (*Brachiaria* spp.) também pode trazer benefícios semelhantes aos que têm trazido ao solo, produtividade e sustentabilidade da produção de grãos. O aporte frequente de matéria orgânica na superfície também é recomendado para manutenção de teores elevados de matéria orgânica do solo.

Plantio sem falhas: Se em sistema de sequeiro, o plantio sem falhas já é importante, no sistema irrigado essa importância é ainda maior. A verticalização reduz o custo por tonelada, mas eleva o custo por área. Por isso, o custo de oportunidade do recurso despendido em compra ou arrendamento da terra, preparo do solo, adubação, tratamentos fitossanitários, etc., em qualquer metro linear sem a presença de plantas é superior no sistema irrigado. Apesar deste sistema favorecer a compensação de falhas com crescimento adicional das touceiras na extremidade das falhas, a compensação não é integral. Por isso, o plantio com zero falha é fundamental para o sistema irrigado de produção.

Outro aspecto relevante a ser considerado em sistema irrigado é o emprego de mudas pré-brotadas (MPB). Pela maior longevidade, o custo de capital de MPB por tonelada de açúcar extraído da área será reduzido substancialmente, aumentando sua viabilidade. Também favorecem a recomendação do MPB sua menor mortalidade por deficiência hídrica nesse sistema, além da maior velocidade de incorporação de novas variedades na usina, e o ganho de velocidade de crescimento que resultará em maior produtividade no primeiro ano de cultivo (MARTINS *et al.*, 2015; COELHO *et al.*, 2018).

Adubação de soqueira: Em sistema irrigado de produção, a dose de macro e micronutrientes durante o ciclo devem ser ajustadas proporcionalmente à exportação de nutrientes, que aumentará em relação às áreas de sequeiro por conta da maior produtividade. Para aumentar a eficiência de utilização de nutrientes também é recomendado o fracionamento das adubações, utilizando a fertirrigação, e considerando a curva de exportação de cada nutriente ao longo do ciclo.

Alguns estudos sobre dosagem de nutrientes para produção irrigada têm sido realizados para auxiliar o ajuste necessário entre o aporte de nutrientes e a extração pela cultura (MOURA *et al.*, 2005; DANTAS NETO *et al.*, 2006; ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2012; GOPALASUNDARAM *et al.*, 2012; SIMÕES *et al.*, 2019; WANDERLEY *et al.*, 2021). Uma rede de experimentos da Embrapa Cerrados também está buscando esses refinamentos de protocolo de nutrição para produção irrigada.

Sugere-se atenção para adubações nitrogenadas quando restar menos de 5 meses para a colheita, dado que ela pode inibir a concentração de açúcar no colmo (MEGDA *et al.*, 2012; SCHULTZ *et al.*, 2015). Em contrapartida, aumentar a oferta de potássio, boro e magnésio colaboram para a maturação da cana (OTTO *et al.*, 2010; CRUSCIOL *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2020).

Em sistema irrigado de produção, a presença de raízes é abundante tanto em profundidade quanto em toda a largura entre as linhas de cultivo. Por isso, se houver necessidade de aplicação de fertilizantes na superfície, sem ser através da fertirrigação, sugere-se não concentrar as adubações ou corretivos estritamente ao lado da soqueira. Ao contrário, recomenda-se que adubações e correções sejam realizadas a lanço, em área total. Além de reduzir o custo da operação, desejamos um ambiente nutricionalmente rico em toda área, para que a planta também desenvolva raízes e explore com eficiência água e nutrientes na entrelinha, sobretudo quando chegar o período de chuvas e a frequência de irrigação for reduzida.

Tratos fitossanitários: Os tratos fitossanitários em sistema irrigado de produção também precisam ser ajustados em relação às práticas de sequeiro.

O microclima em sistema irrigado pode ser mais favorável para propagação de algumas pragas e doenças (BAILEY; BECHET, 1995). Nesses casos, ajustes à intensidade e frequência de monitoramento podem ser necessários. Por outro lado, o microclima mais úmido pode inibir pragas e doenças que se manifestam predominantemente em ambiente mais seco (SENTELHAS, 2016).

Adicionalmente, o microclima mais úmido das áreas irrigadas pode, eventualmente, ampliar janelas e oportunidades de uso de controle biológico (SIMÕES *et al.*, 2019). Também é possível que favoreça a manutenção de níveis mais elevados da população de inimigos naturais, reduzindo a necessidade de intervenção de controle químico.

Quanto aos níveis críticos de dano econômico e controle, é necessário avaliar se os índices que serão adotados para o manejo integrado de pragas e doenças na produção irrigada não têm a ver com padrões de produtividade, velocidade de propagação e dano econômico da praga ou doença em canaviais de sequeiro. Se esse for o caso, pode ser necessário ajustar os índices críticos de controle. Atenção especial é recomendada para doenças fúngicas, sobretudo em canavial adulto com eventos sucessivos de acamamento (CONCEIÇÃO; SILVA, 2011).

Para o manejo fitossanitário, uma das grandes vantagens do sistema irrigado é a ampliação do espectro de estratégias que possibilitam a quimigação - aplicação de insumos químicos e biológicos utilizando a água de irrigação como veículo, seja em pivôs, seja com gotejamento subsuperficial (ANDRADE; BRITO, 2006). A quimigação é especialmente vantajosa quando a grande biomassa de um canavial adulto limita o acesso ao alvo e a eficiência das aplicações aéreas e tratorizadas de baixo volume de calda, como por exemplo, no combate às pragas de solo (GARCIA-SALDAÑA *et al.*, 2019; TANG *et al.*, 2020).

25.6 Considerações finais

A transição de fração substancial da produção de cana-de-açúcar brasileira do sistema de sequeiro para o sistema irrigado de produção não é mais dúvida, o que é resultado: (i) da já consolidada e crescente migração da produção sucroenergética para o Cerrado, (ii) da estagnação da produtividade, que é resultado do represamento do potencial genético pelo *deficit* hídrico acentuado, e (iii) da urgência de verticalização da produção, eficiência, e sustentabilidades econômica, social e ambiental do setor

sucroenergético brasileiro. A velocidade que essa transição ocorrerá. Mas, a velocidade dessa transição dependerá, além da saúde financeira das empresas, da difusão das inovações tecnológicas em sistema irrigado acumuladas na última década e da multiplicação de vitrines tecnológicas e áreas piloto em escala comercial, para evidenciar os resultados possíveis.

Referências

- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I. Vegetative development and production of sugarcane varieties as a function of water availability and thermic units. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.
- ANDRADE, C.L.T.; BRITO, R.A.L. Métodos de Irrigação e Quimigação. **Circular Técnica 86**-Embrapa, n.1, p.1-17, 2006.
- ANDRADE, G.O. O ciclo da cana-de-açúcar no Rio Grande do Norte. **Revista de História da USP**, São Paulo, n.35, p.123-129, 1958.
- ANDRADE, M.C. **A terra e o homem no Nordeste**: contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. 7. Ed. São Paulo: Cortez, 2005.
- ANDRADE, M.C. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**, São Paulo, n.15, v.43, p.267-280, 2001.
- ANDRADE, M.C. **Modernização e pobreza**: a expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social. São Paulo: Unesp, 1994.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.76-84, 2012.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; NOLETO, D.H.; BASTOS, E.A.; MOURA, M.S.B.; ANJOS, J.C.R. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.217-226, 2018.
- BACCHI, J.G.G.M.R.P.; VALDES, L.R.E.T.B.C. **Crescimento e produtividade**. Conab, v.2013, p.239-246, 2013.
- BAILEY, R.A.; BECHET, G.R. The effect of ratoon stunting disease on the yield of some south African sugarcane varieties under irrigated and rainfed conditions. **Proceedings of The South African Sugar Technologists**, p.5, 1995.
- BARBOSA, F.; SHIKIDA, P.; VIAN, C.F. The expansion of sugarcane agroindustry in the Central West Brazilian (1975-2017): a historical-economic analysis. **Gestão e Regionalidade**, v.36, p.283-297, 2020.
- BARBOSA, T.S.; CARVALHO, A.M.; SOUSA, T.R.; ALVIM, R.; VIEIRA, L.V. BUFON, V.B. Decomposição do palhico residual da cana-de-açúcar irrigada no Cerrado. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2020.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 545p., 2019.
- BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado**: análises e projeções. Brasília: Embrapa, 2020. v.1, 308p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212381/1/LV-DINAMICA-AGRICOLA-CERRADO-2020.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2020.
- BUFON, V.B.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, J.M. Acúmulo e partição de biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos na região do cerrado. **Stab**, p.178-183, 2016.

- CAMBRAIA NETO, A.J.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D.; ALTHOFF, D. Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. **Theoretical and Applied Climatology**, v.143, n.3-4, p.1425-1436, 2021.
- CAMPOS, F.H.; BIGATON, A.; TORRES DA SILVA, H.J.; MARQUES, P.V.; COELHO, R.D. Análise de rentabilidade de irrigação na cana-de-açúcar: estudo de caso de uma usina de Goiás. **Revista Pecege**, v.3, n.2, p.124-133, 2017.
- CAMPOS, J.D.O.; CHAVES, H.M.L. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma Cerrado no período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.1880, p.157-169, 2020.
- CAMPOS, P.F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R. **Resposta de variedades de cana-de-açúcar à irrigação com deficit no Cerrado**, p.31-36, 2014.
- CAMPOS, P.F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.6, p.1139-1149, 2014.
- CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.
- CARVALHO, C.P.O. Novas estratégias competitivas para o novo ambiente institucional: o caso do setor sucroalcooleiro em Alagoas: 1990/2001. In: MORAES, M.A.F.D.; SHIKIDA, P.F.A. (org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: Evolução, desenvolvimento e desafio**. São Paulo: Atlas, 2002.
- CARVALHO, K.S.; VIANNA, M.S.; NASSIF, D.S.P. Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.8, p.1362-1368, 2019.
- CARVALHO, S.A.D.; FURTADO, A.T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. **Revista Gestão e Conexões**, v.2, n.1, p.22-46, 2013.
- CASHIN, P.; MCDERMOTT, C.; MCCDERMOTT, C. The long-run behavior of commodity prices: small trends and big variability. **IMF Staff Papers**, v.49, p.2-2, 2002.
- CASTILLO, R. **Dinâmicas recentes do setor sucroenergético no Brasil: competitividade regional e expansão para o bioma cerrado**. GEOgraphia, Niterói: Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Geografia, v.17, n.35, p.95-119, 2015.
- CASTIONI, G.A.; CHERUBIN, M.R.; MENANDRO, L.M.S. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, n.5, p.301-309, 2018.
- CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v.267, p.156-168, 2016.
- COELHO, A.P.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T. Productivity and technological quality of sugarcane cultivars fertigated and planted through pre-sprouted seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.8, p.1265-1271, 2018.
- COELHO, A.P.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T.; LANDELL, E.P.A.; PALARETTI, L.F. Perfilhamento da cana-de-açúcar cultivada com e sem irrigação suplementar e plantada por mudas pré-brotadas: um novo conceito. **Acta Iguazu**, n.5, p.71-84, 2018.
- CONCEIÇÃO, L.L.; SILVA, C.M. O controle biológico e suas aplicações na cultura de cana-de-açúcar. **Campo Digital**, v.6, n.1, p.14-25, 2011.
- COSTA, D.H.; MONDARDO, M.L. A modernização da agricultura no Oeste baiano: migração e novas territorialidades. **Revista Geonorte**, v.7, n.1, p.520-536, 2013.

CRUSCIOL, C.A.C.; ROSSATO, O.B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J.M.; NASCIMENTO, C.A.C. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.48, n.19, p.2314-2323, 2017.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.D.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

DIAS, H.B.; SENTELHAS, P.C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.1, p.29-37, 2019.

EISENBERG, P.L. **Modernização sem mudança**: a indústria açucareira em Pernambuco, 1840-1910. Rio de Janeiro. Paz e Terra, 294p, 1977.

FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.

FILOSO, S.; CARMO, J.B.; MARDEGAN, S.F.; LINS, S.R.M; GOMES, T.F.; MARTINELLI, L.A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. **Renewable Sustainable Energy Review**, v.52, p.1847-1856, 2015.

GARCIA, A.; CRUSCIOL, C.A.C.; MCCRAY, J.M. Magnesium as a promoter of technological quality in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, n.1, p.19-30, 2020.

GARCÍA-SALDAÑA, A.; LANDEROS-SÁNCHEZ, C.; CASTAÑEDA-CHÁVEZ, M. Fertirrigation with low-pressure multi-gate irrigation systems in sugarcane agroecosystems: A Review.

Pedosphere, v.29, n.1, p.1-11, 2019.

GAROFALO, D.F.T.; PACKER, A.P.; RAMOS, N.P.; KONDO, V.Y.; MATSUURA, M.I.S.F.; CABRAL, O.M.R. **Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil**: 1990 a 2018. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente (Documentos, 124), 2020.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v.96, n.9, p.1275-1284, 2009.

GIORDANO, M.; SCHEIERLING, S.M.; TRÉGUER, D.O.; TURRAL, H.; MCCORNICK, P.G. Moving beyond 'more crop per drop': insights from two decades of research on agricultural water productivity. **International Journal of Water Resources Development**, v.37, n.1, p.137-161, 2021.

GOPALASUNDARAM, P.; BHASKARAN, A.; RAKKIYAPPAN, P. Integrated nutrient management in sugarcane. **Sugar Tech**, v.14, n.1, p.3-20, 2012.

GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil.

Scientia Agricola, v.66, n.5, p.593-605, 2009.

INMAN-BAMBER, N.G. **Effect of age and season on components of yield of sugarcane in South Africa**, n.5, p.23-27, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dinâmica territorial da produção agropecuária**. A geografia da cana. Rio de Janeiro. Ed. IBGE. 170p. 2017.

KABLAN, S.; FTITI, Z.; GUESMI, K. Commodity price cycles and financial pressures in African commodities exporters. **Emerging Markets Review**, v.30, p.215-231, 2017.

KLEIN, B.C.; CHAGAS, M.F.; WATANABE, M.D.B.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Low carbon biofuels and the new Brazilian national biofuel policy (RenovaBio): a case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.115, n.8, p.109365, 2019.

KREUZ, C.L.; LANZER, E.A.; PARIS, Q. Funções de produção Von Liebig com rendimentos decrescentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.1, p.95-106, 1995.

- LI, S.; LI, Y.; LIN, H.; FENG, H.; DYCK, M. Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. **Agricultural Water Management**, v.201, p.309-318, 2018.
- MACENA, F.A.; EVANGELISTA, B.A.; MALAQUIAS, J.V.; OLIVEIRA, A.D.; MULLER, A.G. **Análise temporal de variáveis climáticas monitoradas entre 1974 e 2013 na Estação Principal da Embrapa Cerrados**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, p.121, 2009.
- MACHADO, T.; NEVES, M.F.; BIALOSKORSKI NETO, S. Viabilidade econômica da irrigação localizada na cultura da cana-de-açúcar. **Sober**, n.2, p.1-11, 2002.
- MALHI, G.S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v.13, p.1318, 2021.
- MANHÃES, C.M.C.; GARCIA, R.F.; FRANCELINO, F.M.A.; FRANCELINO, H.O.; COELHO, F.C. Fatores que afetam a brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, n.1, p.163-181, 2015.
- MARCUZZO, F.F.N.; MELO, D.C.R.; COSTA, H.C. Sazonalidade e distribuição espaço-temporal das chuvas no bioma do Cerrado do Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.17, p.77-86, 2012.
- MARQUES POSTAL, A.; PASHAEI KAMALI, F.; ASVELD, L.; OSSEWEIJER, P.; SILVEIRA, J.M.F.J.D. The impact of sugarcane expansion in Brazil: Local stakeholders' perceptions. **Journal of Rural Studies**, v.73, October, 2019, p.147-162, 2020.
- MARTINS, A.P.C.; ALBRECHT, L.P.; CASTALDO, J.; CARNEIRO, A.R.; ZUCARELI, V. Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Journal of Agronomic Sciences**, v.4, p.301-317, 2015.
- MEGDA, M.X.V.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; VITTI, A.C. Eficiência agrônômica de adubos nitrogenados em soqueira de cana-de-açúcar colhida sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.12, p.1681-1690, 2008.
- MELO, J.E. **O açúcar no café: agromanufatura açucareira e modernização em São Paulo (1850-1910)**. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MENDES, I.C.; CHAER, G.M.; SOUSA, D.M.G. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. **Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia**, n.8, p.1-11, 2020.
- MOLDEN, D.; OWEIS, T.; STEDUTO, P. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v.97, n.4, p.528-535, 2010.
- MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v.16, n.3, p.264-276, 2014.
- MORAIS, L.K.; CURSI, D. E.; MESSIAS, J. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar**. Embrapa, 2015. Disponível em: www.embrapa.com.br. Acesso em: 1 abr. 2021.
- MOURA, M.V.P.S.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V. Levels of manuring in the sugar-cane crop, first leaf, with and without irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, n.4, p.753-760, 2005.
- NG CHEONG, L.R.; TEELUCK, M. The practice of green cane trash blanketing in the irrigated zone of Mauritius: effects on soil moisture and water use efficiency of sugarcane. **Sugar Tech**, v.18, p.124-133, 2016.
- NORONHA, F.F.M.; CARDOSO, M.R.D.; FARIA, T.G. Chuvas no Cerrado da região centro-oeste do BRASIL: Análise histórica e tendência futura. **Ateliê geográfico**, v.6, n.2, p.112-130, 2012.
- OLIVEIRA, P.T.S.; NEARING, M.A.; MORAN, M.S.; GOODRICH, D.C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H.V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v.50, p.7100-7114. 2014.

OLIVEIRA FILHO, A.T.; RATTER, J.A. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado biome. In: OLIVEIRA, P.S.; MARQUIS, R.J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil**. Columbia University Press, New York, p.91-120, 2002.

OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Effect of a trash blanket on irrigation water use efficiency of sugarcane. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists**, v.81, p.62-74, 2007.

OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. The effect of crop residue layers on evapotranspiration, growth and yield of irrigated sugarcane. **Water SA**, v.38, p.77-86, 2012.

OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: Monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.601-611, 2009.

OTTO, R.; VITTI, C.G.; LUZ, P.H.C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1137-1145, 2010.

PATLE, G.T.; KUMAR, M.; KHANNA, M. Climate-smart water technologies for sustainable agriculture: A review. **Journal of Water and Climate Change**, v.11, n.4, p.1455-1466, 2020.

PERRUCCI, G. A república das usinas. Rio de Janeiro: Paz e Terra, p.246, 1978.

PINTO, V.G.; RIBEIRO, C.B.M.; SILVA, D.D. Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.1, p.91-109, 2016.

PIRES, M.O. Programas agrícolas na ocupação do Cerrado. **Sociedade e Cultura**, v.3, n.1, p.111-131, 2000.

PRADO, H. **Pedologia Fácil - aplicação em solos tropicais**. 4. Ed. Piracicaba: Hélio do Prado. 284p, 2013.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; NUNES, R.S.; KORNDORFER, G.H. **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Cerrado**. (Circular técnica, 29). Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015.

RESENDE, R.S.; NASCIMENTO, T.; CARVALHO, T.B. Reducing sugarcane irrigation demand through planting date adjustment in Alagoas State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, n.2, p.75-81, 2021.

RODRIGUES, G.S.S.C; ROSS, J.L.S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil**: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: Ed. UFU, 272p. 2020.

RODRIGUES, T.R.; VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; OLIVEIRA, R.G.; NOGUEIRA, J.S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical Savanna ecosystem of South central Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.119, n.1, p.1-13, 2014.

RODRIGUEZ, G.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; SCARPARE, F.V.; XAVIER, A.C.; PRUSKI, F.F. Biofuel-water-land nexus in the last agricultural frontier region of the Brazilian Cerrado. **Applied Energy**, May, p.1-16, 2018.

RUIZ-CORRÊA, S.T.; SCARPARE, F.V.; DOURADO-NETO, D. Agricultura irrigada: Produtividade potencial da cana-de-açúcar sem limitações hídricas. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, January, p.67-71, 2013.

SÁ, M.A.C.; FRANZ, C.A.B.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; REIN, T.A.; BUFON, V.B.; CARVALHO, A.M.; MULLER, A.G. **Manejo do palhço residual na cultura da cana-de-açúcar no Cerrado**: Primeira aproximação. Brasília: Embrapa Cerrados (Circular Técnica 27), 2015.

SANTIAGO, A.D.; CHICO, D.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; GARRIDO, A.; CARNAUBA, P.J.P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.209-216, 2018.

- SANTOS, D.L.; SENTELHAS, P.C. Climate change scenarios and their impact on water balance and sugarcane yield in southern Brazil. **Sugar Tech**, v.16, n.4, p.356-365, 2014.
- SATIRO, L.S.; CHERUBIN, M.R.; SAFANELLI, J.L. Sugarcane straw removal effects on ultisols and oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, August, p.86-95, 2017.
- SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.133, p.1318-1327, 2016.
- SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.4576-4584, 2016.
- SCHULTZ, N.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S. **Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada**: fontes nitrogenadas, formas de aplicação, épocas de aplicação e efeito varietal. Documentos 298. Embrapa, n.1, p.1-56, 2015.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.B. El Niño - southern oscillation and its impacts on local climate and sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.6, p.976-985, 2019.
- SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S.H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v.182, p.521-528, 2018.
- SIMÕES, W.L.; OLIVEIRA, A.R.; SOUZA, M.A.; REIS, V.M.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Efficient inoculation of diazotrophic bacteria into sugarcane by the drip irrigation system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, p.6, 2019.
- SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. Ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 416 p. 2004.
- SOUZA, D.M.G.; REIN, T.A.R.; NUNES, R.S.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G. **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. (Comunicado Técnico, 177). Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015.
- SOUZA, C.A.A.; SILVA, T.G.F.; SOUZA, L.S.B. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v.79, n.4, p.400-411, 2020.
- SZMRECSÁNYI, T. 1914-1939: Crescimento e crise da agroindústria açucareira no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 1988.
- TANG, P.; CHEN, C.; LI, H. Investigation of hydraulic performance based on response surface methodology for an agricultural chemigation proportional injector. **Water**, v.12, p.1-15, 2020.
- TONELLO, K.C.; GASPAROTO, E.A.G.; SHINZATO, E.T.; VALENTE, R.O.A.; DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na floresta nacional de Ipanema. **Revista Árvore**, v.38, n.2, p.383-390, 2014.
- VIAN, C.E.F. Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização. Campinas: **Átomo**, 216p. 2003.
- VIAN, C.E.F.; PAULILLO, L.F.O.; SHIKIDA, P.F.A. Expansão e Modernização da produção integrada e açúcar e álcool no Centro-Sul do Brasil no século XX. Travesía. **Revista de História Económica y Social**, v.9, p.175-211, 2007.
- VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação do risco de *deficit* hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.4, p.237-246, 2014.
- VIEIRA FILHO, J.E.R. Fronteira agropecuária brasileira: Redistribuição produtiva, efeito poupa-terra e desafios estruturais logísticos. In: VIEIRA FILHO, J.E.R.; GASQUES, J.G. (Org.). **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, p.89-108. 2016.
- WANDERLEY, L.R.S.; OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; SIMÕES NETO, D.E.; SANTOS, R.L. Nutritional requirement by irrigated Brazilian sugarcane varieties. **Sugar Tech**. 2021.

WANG, J.; ZHANG, Y.; GONG, S. Effects of straw mulching on microclimate characteristics and evapotranspiration of drip-irrigated winter wheat in North China Plain. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.11, n.2, p.122-131, 2018.

YADAV, R.N.S.; YADAV, S.; TEJRA, R.K. Labour saving and cost reduction machinery for sugarcane cultivation. **Sugar Tech**, v.5, n.1-2, p.7-10, 2003.

CAPÍTULO 26

26 SISTEMA IRRIGADO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: MÉTODOS, RECOMENDAÇÕES E RESPOSTA PRODUTIVA

Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira

Resumo

Diversos tipos de equipamento de irrigação são empregados no setor sucroenergético. O carretel enrolador, autopropelido, é o mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento. Mas, como o custo operacional por milímetro aplicado pode ser mais de dez vezes superior ao do pivô ou gotejamento, ele não é indicado para sistema irrigado de produção. Os pivôs são amplamente utilizados para produção irrigada em grandes áreas. Enquanto o pivô central fixo é recomendado para suprimento de lâminas maiores em uma mesma área, o pivô central rebocável e linear são recomendados para ampliar a área coberta com um único equipamento, mas em detrimento da redução de lâmina aplicada em cada área, em estratégias de irrigação deficitária com atendimento inferior a 30% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta inferior a 3 mm dia⁻¹. Pivôs centrais fixos são recomendados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento de 30 a 60% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta entre 3 e 5 mm dia⁻¹. O gotejamento subsuperficial é o sistema com maiores eficiências de aplicação e de produtividade da água, e facilita as práticas de fertirrigação e quimigação. É recomendado para cobrir grandes áreas, com máximo aproveitamento de terra, máxima verticalização de TAH em estratégias de irrigação deficitária, e para atendimento superior a 50% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta superior a 5 mm dia⁻¹. A magnitude e distribuição da demanda hídrica e de irrigação da cana-de-açúcar é influenciada pelo padrão de clima e precipitação da localidade, e por variações intra- e interanuais desse padrão, inclusive causados pelas mudanças climáticas globais. Também influenciam os aspectos genéticos e fisiológicos de cada variedade, a fase fenológica, a capacidade de armazenamento de água do solo, a época de plantio e colheita, além das práticas agronômicas. Na média, precisa-se de 100 mm de ETr para produzir de 5 a 15 toneladas de colmo, com produtividade da água entre 100 e 150 kg mm⁻¹, a depender da variedade, ambiente de produção e manejo agronômico. Em cenário de 650 mm de ETr, típico do Cerrado, para se produzir um TCH maior que a faixa de 65-95 toneladas, precisa-se adicionar água via irrigação, e aproveitar melhor a ETc que a baixa Pef não permitiu converter em ETr. No Cerrado, estratégias de irrigação deficitária para elevar em 40% o TAH e em quase 100% a longevidade do canavial demandam aplicação de 300 a 1.000 mm em 12 meses de cultivo. A maioria dos insucessos de principiantes no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar deve-se a dois aspectos: (i) não ajustar as práticas agronômicas, simplesmente replicando as práticas de sequeiro e adicionado água, e (ii) falhas no manejo de irrigação. Uma análise detalhada dos métodos e parâmetros de manejo disponíveis na literatura mundial e brasileira é realizada nesse capítulo. Recomenda-se o manejo da irrigação de cana-de-açúcar pelo método combinado, que adota o método via clima como base, mas conjuga a umidade do solo e sensoriamento da planta como camadas adicionais de informação e aferição. O capítulo ainda recomenda parâmetros customizados para o método combinado nas áreas de produção moderna do Cerrado, além de compartilhar dicas e informações para escolher as melhores estratégias de manejo e maturação (*drying-off*), fruto de informações da literatura brasileira e mundial,

além da experimentação e experiência acumuladas nos últimos 10 anos. Uma ampla revisão de respostas produtivas da cana-de-açúcar à adoção do sistema irrigado é apresentada. Pela primeira vez, apresenta-se os resultados recém compilados de experimento de longa duração realizada pela Embrapa Cerrados, que apresentou média acumulada de 8 cortes e 12 variedades de 162 para TCH e 138 para ATR. A evolução do domínio da estratégia de *drying-off* possibilitou atingir valores de ATR na área irrigada no mínimo iguais, mas frequentemente superiores às áreas de sequeiro, com ganhos adicionais acima de 10 toneladas de açúcar por hectare, por ano. Com exceção da estratégia de atendimento de 100% da irrigação total necessária, todas estratégias de irrigação deficitária resultaram em ganhos de produtividade da água, com variedades mais responsivas auferindo ganhos superiores a 50%. Para o Cerrado, a estratégia de reposição de 75% da irrigação total necessária resulta no melhor equilíbrio entre potencial produtivo e sustentabilidade do uso da água. Por isso, recomenda-se exclusivamente a adoção de estratégias de irrigação deficitária. Em nenhuma hipótese recomenda-se reposição de 100% da demanda hídrica da cultura. Finalmente, o capítulo aborda aspectos para execução racional de um plano de investimento em sistema irrigado de produção sustentável, inclusive abordando aspectos não convencionais, mas fundamentais para uma análise de viabilidade mais ampla, coerente, e mais aderente com os resultados de fato atingíveis.

26.1 Introdução

A transição de fração da produção de cana-de-açúcar brasileira do sistema de sequeiro para o irrigado não é mais dúvida. Mas, a velocidade dessa transição dependerá, além da saúde financeira das empresas, da difusão das inovações tecnológicas em sistema irrigado acumuladas na última década e da multiplicação de vitrines tecnológicas e áreas piloto em escala comercial, para evidenciar os resultados possíveis.

Além de fazer ampla revisão da literatura brasileira e mundial, esse capítulo conjuga a experiência acumulada nos últimos 10 anos de pesquisa em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Cerrado, para recomendar tipos de equipamento de irrigação, métodos e parâmetros de estimativa de demanda hídrica e de irrigação, métodos de manejo da irrigação, definição de estratégias de irrigação e maturação (*drying-off*). Adicionalmente, relata-se, em primeira mão, um compilado de resultados de experimento de longa duração com 8 cortes e 12 variedades no Cerrado. Finalmente, recomenda-se estratégias para execução de um plano de investimento e análise de viabilidade de sistema irrigado de produção sustentável.

26.2 Tipos de sistema de irrigação para cana-de-açúcar

São diversos os tipos de equipamento de irrigação utilizados na cultura de cana-de-açúcar. Os mais relevantes serão abordados a seguir.

26.2.1 Carretel enrolador

O carretel enrolador, também chamado de autopropelido, é o sistema mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento. Com adutoras móveis e bombeamento à diesel, permitem, com pouca infraestrutura, grande mobilidade e aplicação de pequenas lâminas em grandes áreas. Por outro lado, sua limitação de movimento em canavial adulto e seu custo operacional por milímetro aplicado o tornam incompatíveis com as maiores lâminas e diversas aplicações ao longo do ano, aspectos fundamentais para um sistema irrigado de produção.

O custo operacional por milímetro aplicado com carretel enrolador pode chegar a ser dez ou mais vezes superior ao custo por milímetro aplicado com pivô ou gotejamento. No entanto, o carretel enrolador possui menor custo de capital e maior robustez para trabalhar com vinhaça e água residuária, raramente sendo substituído por pivô ou gotejamento para aplicação desses resíduos e irrigação de salvamento.

26.2.2 Pivô central fixo, rebocável e linear

Os pivôs são amplamente utilizados para produção irrigada em grandes áreas, possuindo três versões: pivô central fixo, pivô central rebocável e pivô linear (ou lateral móvel).

No pivô central fixo e rebocável, uma área circular recebe uma estrutura suspensa (linha lateral) que gira ao redor de uma torre central distribuindo água. Na versão pivô central fixo, a torre central e a linha lateral ficam fixas e dedicadas a uma única área, enquanto na versão rebocável a torre central e a linha lateral podem ser transportadas para outras áreas por trator, ou sistema de auto reboque. A versão pivô linear também é rebocável, mas, ao invés de pivotar ao redor de uma torre central, movimenta-se linear e paralelamente às linhas de plantio, cobrindo áreas retangulares.

A intensidade de aplicação de água do pivô central aumenta no sentido da torre central para a extremidade e, quanto maior o pivô, maior a taxa de aplicação na extremidade final. Por esse motivo, pivôs centrais de grande dimensão ficam limitados a estratégias de menor satisfação da demanda hídrica, já que a taxa de aplicação instantânea não pode ultrapassar a capacidade de infiltração de água no solo, sob pena de causar escoamento superficial e erosão.

Nos últimos anos, o avanço na tecnologia de emissores para pivôs tem permitido que eles operem com baixas pressões, próximas às utilizadas em irrigação localizada. Outro avanço é o incremento do tamanho de gota que, além de reduzir perdas por evaporação e arraste, aumenta o raio de alcance dos emissores e reduz a precipitação instantânea, o que permite projetos com lâminas e/ou linhas laterais maiores, além de maior eficiência energética e uniformidade de aplicação superiores a 90%. Podem ainda ser utilizados para aplicação de vinhaça e água residuária, desde que revestidos com materiais anticorrosivos.

Como podem ser acionados rapidamente em veranicos nos meses da estação chuvosa, o pivô central fixo apresenta vantagem adicional aos sistemas móveis, já que, via de regra, as usinas dispensam a mão-de-obra contratada para irrigação com sistemas móveis logo no início do período chuvoso.

As operações de fertirrigação e quimigação com pivôs são muito eficientes quando o objetivo é a aplicação de produtos não-sistêmicos e que visam o molhamento de toda parte aérea da cultura. Por outro lado, quando o alvo da fertirrigação e quimigação é estritamente o solo e a área radicular, a eficiência de aplicação pode ser reduzida, sobretudo em canaviais adultos, com grande biomassa.

Enquanto o pivô central fixo destina-se com maior frequência ao suprimento de lâminas maiores em uma mesma área, o pivô central rebocável e linear destinam-se, mais comumente, a ampliar a área coberta com um único equipamento, mas em detrimento da redução de lâmina que consegue entregar para cada área. Com lâmina aplicada menor, o potencial produtivo também é inferior. Em relação ao fixo rebocável, o linear permite melhor aproveitamento de área, desde que o formato do terreno o favoreça.

O pivô central, especialmente o fixo, tem como vantagens a simplicidade de operação e manutenção, elevada eficiência de aplicação, baixo consumo de energia e mão-de-obra, possibilidade de automação e flexibilidade no manejo da irrigação, que resultam em baixo custo por milímetro irrigado. Essas vantagens explicam sua rápida adoção para sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar, tendo Carr e Knox (2010) reportado aumento de seu uso, especialmente na África do Sul, Brasil e Austrália. Por outro lado, pivôs apresentam menor aproveitamento de área, maior limitação para lâminas altas com um único equipamento, e uma flexibilidade de manejo, fertirrigação e eficiência de aplicação ligeiramente inferiores ao gotejamento. Com isso, tendem a perder competitividade para o sistema de gotejamento à medida que se adotam estratégias de maior satisfação da demanda hídrica.

Para cobertura de grandes áreas de cana-de-açúcar, pivôs rebocável e linear são mais frequentemente indicados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento inferior a 30% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta inferior a 3 mm dia⁻¹. Já os pivôs centrais fixos costumam ser mais frequentemente indicados para estratégias de irrigação deficitária com atendimento de 30 a 60% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta entre 3 e 5 mm dia⁻¹.

26.2.3 Gotejamento superficial e subsuperficial

Recentemente, o gotejamento superficial tem sido adotado em sistemas móveis como estratégia de salvamento, sobretudo para plantio com mudas pré-brotadas. Nesse caso, capta-se água diretamente em caminhões-tanque estacionados à beira das áreas que serão irrigadas. Ao finalizar o salvamento da área, recolhem-se os tubogotejadores, linhas de derivação de polietileno, e move-se o sistema para outra área.

Contudo, para o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial é o mais adequado. Quando subsuperficial, o tubo gotejador, ou linha gotejadora, fica enterrado imediatamente abaixo, ou ligeiramente ao lado, da linha de plantio. A água é aplicada diretamente na região radicular, molhando apenas parte do volume do solo, reduzindo as perdas de água por evaporação (OLIVER; SINGELS, 2001).

Em termos de eficiência de aplicação e PA, o gotejamento subsuperficial é considerado o melhor de todos os métodos disponíveis. A água é aplicada em pequenas vazões, baixas pressões e alta frequência, permitindo manter a umidade do solo com pequena variação próxima à capacidade de campo, com pouco riscos de perdas por escoamento superficial ou percolação profunda. Sua boa uniformidade de aplicação também não depende das condições de vento e, por estar enterrado, não impede o trânsito de máquinas durante a irrigação. Destacam-se ainda a economia de fertilizantes, energia e mão-de-obra, capacidade de completa automação e um melhor aproveitamento da área, podendo cobrir praticamente qualquer tamanho, forma e declividade de terreno.

Quanto à fertirrigação e quimigação, apresenta grande eficiência, sobretudo quando se deseja posicionar os insumos exclusivamente no solo e/ou mais próximos ao sistema radicular, sem atingir a parte aérea. Essa é uma grande vantagem para o setor sucroenergético, por exemplo, no combate às pragas de solo. Contudo, quando o alvo da quimigação for a parte aérea da cultura, produtos sistêmicos precisam ser empregados.

Como limitações pode-se relacionar o maior custo de implantação para lâminas baixas e a demanda de uma equipe técnica mais qualificada. Em relação ao pivô, precisa-se dispensar atenção especial à qualidade física, química e biológica. Devido aos

pequenos orifícios de saída dos gotejadores e a baixa pressão, os sistemas de irrigação localizada requerem tratamento de água e filtragem eficientes e compatíveis com a qualidade da água disponível. Assim como no pivô, a vida útil do gotejamento subsuperficial e o uso potencial de suas vantagens estão fortemente associados aos cuidados na operação, manutenção e práticas de manejo. Carr e Knox (2010) reportam o uso deste sistema na cana há vários anos, em diversos países, e ressaltam a vantagem relacionada à economia no uso da água e nutrientes. Estes autores ainda reportam que a obtenção dos benefícios característicos do sistema está fortemente relacionada à adequação das práticas de manejo.

Para produção irrigada de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial tem sido instalado, comumente, em profundidade de 0,2 a 0,4 m. Quanto mais profundo for o enterrio das linhas gotejadoras, maior a redução de problemas com vandalismo, dano mecânico e a interferência nas operações agrícolas, além de manter a superfície do solo mais seca, diminuindo a incidência de plantas invasoras e reduzindo significativamente as perdas de água por evaporação.

O enterrio mais profundo é viável desde que a engenharia e manejo da irrigação do projeto sejam feitos de forma rigorosa e de acordo com as características do solo. Caso contrário, podem ocorrer perdas de água e de nutrientes por lixiviação e molhamento insatisfatório das plantas, em especial em solos arenosos.

Para o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, o gotejamento subsuperficial é mais frequentemente recomendado quando a estratégia visa cobrir grandes áreas, com grande aproveitamento de terra, visando máxima verticalização com estratégias de irrigação deficitária, para atendimento superior a 50% da demanda hídrica da cana-de-açúcar, ou em projetos com lâmina bruta superior a 5 mm dia⁻¹.

26.3 Demanda hídrica e de irrigação

A demanda hídrica de uma cultura depende substancialmente do clima. Regiões distintas possuem padrões climáticos distintos. Além de apresentar variações dentro do mesmo ano a cada estação, uma determinada região pode apresentar variações climáticas em anos distintos, por conta das oscilações do clima em escala global, com fenômenos como *El Niño*, *La Niña* e outros (SENTELHAS; PEREIRA, 2019). Com as mudanças climáticas globais, essas variações dentro do ano, e a cada ano, também estão cada vez mais intensas e frequentes (SANTOS; SENTELHAS, 2014). Para mensurarmos o potencial climático utilizamos o termo Evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN *et al.*, 1998).

A demanda hídrica da cultura também depende da sua genética e da fase fenológica (idade, ou fase de desenvolvimento e crescimento) que se encontra. Quando se trata da mesma espécie e, em especial quando consideramos a cana-de-açúcar, as diferenças de demanda hídrica entre variedades são inferiores àquelas que dizem respeito às fases fenológicas. Para cana-de-açúcar, dividimos essas fases fenológicas da seguinte forma: (i) germinação (ou brotação, para cana soca); (ii) perfilhamento e desenvolvimento inicial; (iii) desenvolvimento pleno, e (iv) maturação (FRANCISCO *et al.*, 2016; APARECIDO *et al.*, 2020). Um canavial pequeno na Fase I tem demanda hídrica menor do que na Fase II que, por sua vez, tem demanda inferior à Fase III. Quando passa da Fase III para Fase IV, a cana-de-açúcar reduz seu vigor vegetativo e demanda hídrica (SILVA *et al.*, 2013; MARIN *et al.*, 2020).

Para cada fase fenológica de cada cultura utilizamos parâmetros (coeficientes de cultura - K_c) que convertem a demanda potencial do clima (ET_o), em demanda potencial da cultura (evapotranspiração potencial da cultura - ET_c ou ET_p).

A ET_c é a máxima demanda que determinada cultura, de determinada idade, segundo seu melhor potencial genético, conseguiria perder por evapotranspiração em dada condição climática se não estivesse sob nenhum tipo de estresse biótico ou abiótico (DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN *et al.*, 1998). Podemos associar a ET_c ao tamanho, potência, de uma motobomba. Quanto maior essa motobomba, maior será a quantidade de água que poderá ser absorvida pelas raízes da planta e transportada pelos colmos até chegar às folhas, de onde será transpirada para atmosfera. E maior será a quantidade de água que poderá ser evaporada do solo.

Nas regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil, a ET_c em um ciclo de 12 meses pode variar, frequentemente, entre 800 e 2000 mm, podendo, eventualmente, atingir valores menores e maiores (CABRAL *et al.*, 2015; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014).

Contudo, a disponibilidade hídrica no solo nem sempre está plena e as plantas reagem a essa deficiência hídrica adotando diversos artifícios para reduzir sua vulnerabilidade, reduzindo sua demanda de água para processos fisiológicos e a perda de água por transpiração. A cana-de-açúcar, mediante condições de deficiência hídrica, fecha estômatos, reduz a multiplicação e expansão celular, enrola e senesce folhas e ativa diversos outros mecanismos para reduzir sua demanda hídrica (SMIT; SINGELS, 2006; PINCELLI; SILVA, 2012; SILVA *et al.*, 2014; VINÍCIUS *et al.*, 2017). Em estágios iniciais de estresse hídrico, a cana-de-açúcar inibe o vigor vegetativo, o crescimento, e acelera mecanismos de sobrevivência, como o armazenamento de açúcar. Em um segundo estágio, de deficiência hídrica mais severa, até mesmo o armazenamento de açúcar é afetado (INMAN-BAMBER, 2002; INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; BUFON *et al.*, 2014; BUFON *et al.*, 2016).

Todos esses processos impactam na intensidade de transpiração e, logo, na evapotranspiração que realmente ocorre. Por isso, para calcular a evapotranspiração real da cultura (ET_r ou ET_a), ou seja, a demanda real da cultura, precisamos converter a ET_c em ET_r (ALLEN *et al.*, 1998; CARR; KNOX, 2011). Para conversão da evapotranspiração potencial em evapotranspiração real da cultura, multiplicamos a ET_c pelo coeficiente de estresse (K_s), que é função da disponibilidade de água no solo.

No caso da cana-de-açúcar, por ser plantada e colhida ao longo de vários meses do ano, sua demanda hídrica também depende da época de plantio e colheita, ou seja, da interação entre o efeito do clima e a idade da cultura. Um canavial colhido no início de safra passará pelo período de maior ET_o do Cerrado (agosto e setembro) ainda nas Fases I e II, com pequena biomassa, menor demanda e *deficit* hídrico do que um canavial colhido no final de safra, que brota e cresce com abundância no período chuvoso e chega ao início da estação seca do ano seguinte na Fase III, com enorme biomassa para ser sustentada, justamente quando a ET_o é máxima e a oferta de chuva é mínima.

Por essa razão, a demanda hídrica também está associada à época de colheita e produtividade que se almeja alcançar. A ET_r necessária para a mera sobrevivência da cana-de-açúcar é diferente daquela para atingir um nível aceitável, ou um nível elevado, de produtividade (BUFON *et al.*, 2014; BUFON *et al.*, 2016). Quanto mais água passar por dentro da planta e for transpirada, maior a ET_r e maior será a produtividade (INMAN-BAMBER, 1999; CARR; KNOX, 2011; CARVALHO *et al.*, 2019). E quanto maior o percentual da ET_r devido a transpiração, e não a evaporação, maior também será a produtividade.

Uma motobomba enorme (ou ET_c enorme) não succiona muita água se estiver sobre um reservatório vazio. Ou seja, a ET_r da cana depende da disponibilidade de

água, da oferta de água de chuva e irrigação e do tamanho do reservatório de água no solo, que é afetado tanto pelas características físicas do solo quanto pela profundidade do sistema radicular da cana.

A Pef, fração da chuva que se converte em ETr, depende não só do volume, mas também do padrão de distribuição da chuva. No Cerrado, por conta da grande concentração da chuva em poucos meses do ano, geralmente, apenas metade da chuva se torna Pef para cana-de-açúcar. A outra metade escoava para rios e lagos, e infiltra para baixo da zona radicular, não sendo transpirada pela planta.

A conversão de chuva em Pef também depende da capacidade de armazenamento de água do solo (BOSQUILIA *et al.*, 2019). Quanto maior a capacidade de armazenamento de água do solo, maior a Pef. A fração da ETc que não pode ser atendida pela Pef, que não se converte em ETr, é chamada *deficit* hídrico (ALLEN *et al.*, 1998).

Por exemplo, num período de 30 anos em Goianésia, Goiás, na maior parte dos anos, o canal de sequeiro evapotranspirou aproximadamente 650 mm em uma safra de 12 meses. Mas houve anos em que o mesmo canal evapotranspirou 400 mm e outros em que esse valor chegou a 1.400 mm. Essa mesma magnitude de variação é experimentada em regiões produtoras tradicionais de São Paulo, principalmente no Cerrado do estado (CABRAL *et al.*, 2012).

Carr e Knox (2011) apresentaram uma revisão sobre as relações hídricas e as necessidades de irrigação para a cana-de-açúcar, e identificaram demandas variando entre 1.100 a 1.800 mm para as savanas da Austrália e África do Sul, ambiente parecido com nosso Cerrado. Dependendo do local, a ETr diária chegou a atingir picos de 6 a 15 mm.

Na média, precisa-se de 100 mm de ETr (ou 1 milhão de litros por hectare) para que um canal entregue de 5 a 15 toneladas de colmo, o que resultaria em uma PA entre 100 e 150 kg mm⁻¹ a depender da variedade, ambiente de produção e do padrão de manejo agrônomo. Por isso, em um cenário de 650 mm de ETr e que se pretende produzir um TCH maior que a faixa de 65-95 toneladas, precisa-se adicionar água via irrigação, e aproveitar melhor a ETc que a baixa Pef não permitiu converter em ETr.

No Cerrado, onde está a maior parte da cultura de cana brasileira, estratégias de irrigação deficitária para elevar em 40% o TAH e em quase 100% a longevidade do canal podem resultar na aplicação de 300 a até mais de 1.000 mm em 12 meses de cultivo.

26.4 Manejo da irrigação

Como salienta Bernardo *et al.* (2019), o sistema irrigado é dinâmico e as etapas de estudo de viabilidade, projeto hidráulico e implantação não podem ser compreendidas desassociadas da operação e manejo do sistema irrigado. O manejo da irrigação deve aplicar as melhores estratégias de distribuição da água ao longo do ciclo, considerando tanto aspectos inerentes a cada projeto (lâmina de projeto, metas de produtividade, aspectos sociais e mão-de-obra, estratégias nutricionais e fitossanitárias, manutenção ou aprimoramento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manutenção e vida útil dos equipamentos) quanto aspectos comuns a todos os sistemas de irrigação, ou seja, quando e quanto aplicar por evento de irrigação, uniformidade de aplicação e eficiência da irrigação.

Junto com as falhas de ajuste nas práticas agrônômicas do sistema de sequeiro para o irrigado, as falhas no manejo de irrigação são responsáveis pela grande maioria

dos insucessos de investimentos em sistema irrigado de produção. E essas falhas nada têm a ver com o potencial do sistema irrigado de produção, mas com a deficiência de capacitação técnica e de qualidade gerencial para aplicar essa tecnologia.

26.4.1 Métodos de manejo da irrigação

A aplicação eficiente de qualquer método de manejo de irrigação requer conhecimento das inter-relações entre solo, água, planta e atmosfera. Dentre os métodos mais utilizados para o manejo da irrigação destacam-se o método via solo, e o método via clima.

26.4.1.1 Manejo via solo

No manejo via solo, estipula-se uma faixa adequada de umidade ou tensão de água no solo e instala-se equipamentos de medição distribuídos espacialmente e em profundidades distintas do solo da área irrigada. Toda vez que a umidade do solo declinar para valores inferiores aos ideais, ou que a tensão de retenção da água no solo subir para valores superiores aos ideais, calcula-se e aplica-se uma lâmina de irrigação que eleve a umidade, ou diminua a tensão, para os níveis desejados.

Existem medidores de leitura manual e, mais recentemente, uma infinidade de opções de medidores automatizados, sobretudo sensores de umidade, que coletam e enviam remotamente a informação.

O manejo eficiente da irrigação via solo, por depender exclusivamente dessa camada de informação, requer excelente acurácia da informação de umidade de cada sensor, e ainda de uma quantidade suficiente de pontos de monitoramento ao redor da lavoura para absorver as discrepâncias intrínsecas à variabilidade espacial do solo e da cultura.

Dos inúmeros sensores eletrométricos disponíveis comercialmente, poucos possuem precisão e acurácia adequadas para o manejo de irrigação em solos tropicais. Mas, por conta do custo, acabam sendo empregados estritamente na pesquisa. Os sensores eletrométricos de menor custo, apesar da simplicidade de uso, não entregam exatidão inferior a 3,5% em umidade volumétrica para nossos solos tropicais (SCHWARTZ; EVETT, 2016; LEÃO *et al.*, 2020; SCHWARTZ *et al.*, 2020). Considerando que, em média, nossos solos armazenam cerca de 1 mm de água para cada centímetro de solo, ou seja, 10% em volume, o nível de precisão desses medidores resulta em erro de até 35% da água disponível para cultura. Quando utilizados sensores com exatidão inferior a 1,5% de umidade volumétrica, o manejo via solo é uma alternativa viável.

Contudo, não recomendamos que o manejo via solo seja a primeira opção para manejo de irrigação em grandes áreas sob sistema irrigado de cana-de-açúcar. Um manejo eficiente com esse método demandaria uma enorme quantidade de sensores de custo elevado, além da dificuldade de instalação, automação, operacionalização e manutenção desses sensores.

26.4.1.2 Manejo via clima

Para o manejo via clima, define-se um volume de controle do solo a partir do qual todas as entradas e saídas de água são estimadas - balanço hídrico. Esse volume de controle do balanço hídrico é a Capacidade Total de Armazenamento de Água do Solo (CTA).

Capacidade total de armazenamento: a CTA é definida tanto pela CAD/ z quanto pela profundidade do sistema radicular (z). A CAD/ z depende intrinsecamente da textura e estrutura do solo, é dada em mm cm^{-1} , e informa quantos milímetros de água por centímetro de profundidade um solo é capaz de reter, sem que ela se perca por percolação profunda (escoamento). Já a profundidade do sistema radicular para manejo de sistemas irrigados, além das características da planta, também envolve decidir qual profundidade ou, qual volume de controle, se deseja adotar para manejar a irrigação.

Uma estratégia é considerar a profundidade radicular efetiva (z), que é aquela em que se encontram 80-90% de todo o volume radicular da planta (CUNHA *et al.*, 2010; SMIT *et al.*, 2000). A z é sempre menor que a profundidade radicular máxima de uma cultura. A distribuição e profundidade radicular é definida pela presença de barreiras químicas e físicas do solo, pela genética da cultura e pela oscilação da presença de água e nutrientes ao longo do ciclo. A planta ajusta a densidade de raízes, expandindo ou contraindo, para encontrar água e nutrientes disponíveis para seu crescimento.

Por essa razão, em sistemas irrigados, a profundidade de manejo não precisa ser, necessariamente, um valor comum de z dessa cultura no sequeiro. Como controla-se a irrigação e a fertirrigação, pode-se induzir a planta a concentrar raízes na região do solo que se deseja definir como volume de controle.

Em ambientes mais áridos, com pouca disponibilidade de chuva, permite-se confinar o sistema radicular em um percentual menor do volume total disponível para a planta. Contudo, no Cerrado, apesar dos 5-6 meses de pouca ou nenhuma precipitação, temos 6-7 meses com boa precipitação. Nesse caso, confinar demasiadamente o sistema radicular implicaria em não ter raízes disponíveis para explorar água e nutrientes fora desse pequeno volume no período chuvoso.

Um volume de raízes excessivo implica em gasto de carboidratos que poderiam estar sendo utilizados para ganho de produtividade de colmos e açúcar. Por outro lado, quanto menor o volume de controle maior a suscetibilidade da cultura para o estresse hídrico caso haja falhas no sistema de irrigação, além de reduzir o uso dos nutrientes e água da chuva nas regiões do solo onde não há densidade radicular suficiente.

Balanco hídrico: no manejo via clima estima-se a umidade do solo diariamente através do balanço hídrico, que é a estimativa do saldo remanescente de água no solo após considerar as entradas (chuva e irrigação) e saídas (ET_r, escoamento superficial e lateral, e percolação profunda) de água no volume de controle (CTA).

Para estimativa da ET_r, estima-se primeiro a ET_o com dados de uma estação meteorológica nas proximidades da área, medindo as variáveis temperatura, radiação, umidade relativa e velocidade do vento para estimar a demanda climática. Na mesma estação, ou em pontos adicionais, também é mensurada a precipitação. A partir dos valores de ET_o e do coeficiente de cultura (K_c) referentes à fase fenológica que está a cultura, estima-se a ET_c. Com a ET_c e valores de coeficiente de estresse (K_s), estima-se a fração da ET_c que se converte em ET_r.

Quando irrigar: o momento de irrigação é definido através do nível de umidade crítico, chamado de Fator de Disponibilidade Hídrica (f). O f representa o nível de depleção da umidade do solo permitido pela estratégia de irrigação, variando de 0 a 1. Um f igual a 0,1 significa que o manejo será conduzido de tal forma que, quando for consumido 10% da CTA, um evento de irrigação será realizado. Um f igual a 0,5 implica em eventos de irrigação toda vez que 50% da CTA for consumida. A decisão do f para

cada fase fenológica tem a ver com a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico nessa fase. Quanto mais sensível, menor o valor de **f** que se utiliza para disparar as irrigações.

Quanto irrigar: o volume de irrigação necessário é calculado pela diferença entre a umidade atual do solo e a umidade para a qual se deseja elevar.

Mais detalhes sobre procedimentos de cálculo de evapotranspiração e balanço hídrico de culturas podem ser consultados em Doorenbos e Kassam (1979) e Allen *et al.* (1998).

26.4.1.3 Método combinado de manejo

O método via clima é mais adequado para aplicação em grandes áreas, sem a necessidade de uma enorme quantidade de sensores espalhados pelo campo. Por outro lado, por se basear estritamente em estimativas, podem resultar em erros que só seriam identificados quando algum dano ao desenvolvimento da cultura já tivesse ocorrido.

Por essa razão, recomenda-se o **método combinado de manejo** para sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar em grandes áreas. Esse método conjuga estratégias do método via solo e via clima, e ainda adiciona uma terceira camada, o sensoriamento da planta.

No método combinado, utiliza-se como referência principal o método via clima. Tal qual descrito acima, sem modificações. E adicionamos ao sistema de tomada de decisão mais duas camadas de informação e aferição.

A primeira camada é o monitoramento da umidade do solo. Mas diferentemente do método de manejo via solo, não distribuímos muitos sensores ao redor da área, nem nas mesmas profundidades, e nem precisamos de grande exatidão da aferição umidade do solo. Coloca-se apenas alguns sensores eletrométricos em profundidades estratégicas para aferir o método via clima. Um primeiro sensor é localizado no limite inferior da zona de controle e um segundo sensor de 10 a 15 cm abaixo do primeiro sensor. Ou seja, 10 a 15cm abaixo do limite inferior da zona de controle do manejo. Se o primeiro sensor não detectar a chegada de água após o evento de irrigação, temos um alerta de subestimativa da demanda de irrigação. Se, por outro lado, a chegada de água é detectada no primeiro sensor, mas também no segundo sensor, temos um alerta de superestimativa da demanda hídrica. Pelo fato de demandar apenas a detecção da presença de água, e não sua quantidade com exatidão, sensores eletrométricos de menor custo atendem satisfatoriamente ao objetivo de adição de uma camada de monitoramento no método combinado de manejo. A segunda camada é o monitoramento da temperatura do dossel da cultura. Utilizamos parâmetros conhecidos de temperatura do dossel da cana-de-açúcar sob condições ótimas de manejo de irrigação e, através de imagens tomadas por drones e satélites, aferimos se o manejo de irrigação está propiciando pleno desenvolvimento para o canavial.

26.5 Parâmetros para estimativa de demanda hídrica

26.5.1 Capacidade de água disponível

Recomenda-se amostragens a campo para determinação da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade. Para determinação da CC, recomenda-se amostras indeformadas e o método da Mesa de Tensão, ou método da bacia de saturação à campo. Essa mesma amostra indeformada por ser utilizada para determinação da densidade do solo. Para o PMP, recomenda-se o uso de amostras

deformadas com método de Richards ou semelhante. A mesma amostragem deformada para PMP pode ser utilizada para análise de textura.

Na ausência de informações tomadas diretamente a campo, a título provisório, sugere-se considerar os valores de CAD estimados por Prado (2018).

26.5.2 Profundidade radicular e profundidade de controle

Sem barreiras físicas ou químicas, o sistema radicular da cana-de-açúcar pode chegar até 6m de profundidade, mas a maior densidade fica concentrada na faixa de 1,5 a 2 m (SMITH *et al.*, 2005; ARAÚJO, 2018).

Nos solos tropicais, em razão da deficiência de cálcio e fósforo em profundidade, a maior densidade de raízes na cana-de-açúcar encontra-se restrita à profundidade do preparo e correção do solo.

Na Tabela 1 apresenta-se o padrão de distribuição de raízes de cana-de-açúcar disponíveis na literatura para diversas localidades e variedades, sob diferentes cenários de oferta hídrica e em ciclo de cana planta e cana soca.

Tabela 1. Distribuição radicular em cana-de-açúcar por camada de solo (cm) e sistema de irrigação.

Referência	Sistema de Irrigação	Ciclo	Proporção de raízes por camada de solo (%)				
			0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Laclau (2005)	Aspersão	Planta	51,6	36,7	11,1	0,4	-
Farias <i>et al.</i> (2008)	Pivô Central	Planta	55,6	20,1	12,0	8,9	3,2
Ohashi <i>et al.</i> (2015)	Gotejamento Subsuperficial	Soca	53,6	29,5	12,9	4,0	-
Ohashi <i>et al.</i> (2015)	Gotejamento Subsuperficial	Soca	53,3	31,2	10,8	4,7	-
Clemente <i>et al.</i> (2017)	Aspersão	Planta	55,5	32,3	12,7	-	-

26.5.3 Coeficiente de cultura

Na Figura 1, apresenta-se uma análise de valores de Kc por fase fenológica da cana-de-açúcar, utilizando-se dados de 34 publicações que estimaram ou determinaram o Kc por diversos métodos, tanto para lavouras no Brasil (10 publicações) quando em outros lugares do mundo (24 publicações), entre 1967 e 2020. Essas diferenças podem estar associadas aos fatores que afetam as taxas de transpiração e evaporação, como diferenças varietais e, principalmente, práticas agrônômicas e sistemas de produção. Por exemplo, diferentes espaçamentos entre fileiras de cultura, arquitetura de dossel, velocidade de crescimento da planta, sombreamento do solo e padrões de molhamento do solo pela irrigação podem afetar tanto a transpiração quanto a evaporação.

O método sugerido por Allen *et al.* (1998) para cálculo da evapotranspiração da cultura pressupõe que as diferenças regionais e metodológicas de estimativas de ETc podem ser reduzidas, deixando para a ETo a responsabilidade de capturar majoritariamente os efeitos do clima e para o Kc a função de transformar o potencial do clima em potencial da cultura. Para determinação dos valores de Kc, submete-se a cultura à condições ideais, onde nenhuma restrição biótica ou abiótica limite seu desenvolvimento e transpiração. No entanto, garantir essa ausência absoluta de estresse biótico e abiótico pode ser um grande desafio, sobretudo para uma cultura

como a cana-de-açúcar, em que o sistema irrigado de produção não está completamente dominado.

Outro aspecto importante é a evidência de que, em vários dos estudos utilizados, condições hídricas e nutricionais ótimas, sobretudo no Brasil, não foram garantidas. Por isso, possivelmente, dificuldades experimentais conduzam mais frequentemente à subestimativa do que à superestimativa dos valores de Kc no Brasil.

Adicionalmente, valores de Kc são influenciados pela resistência aerodinâmica ou outros mecanismos que inibem a transpiração da cultura sob condições de ET_0 elevadas, sobretudo quando superior a 5 mm dia^{-1} . Nesses casos, Allen *et al.* (1998) e Marin *et al.* (2020) sugerem equações para correção dos valores de Kc.

Julgamos que o aperfeiçoamento de valores de Kc específicos para diferentes variedades e espaçamentos entre fileiras utilizados no Brasil não são, no momento, prioritários ante ao bom domínio dos ajustes agrônômicos para um sistema irrigado de produção, e do manejo de irrigação utilizando parâmetros de Kc já disponíveis na literatura.

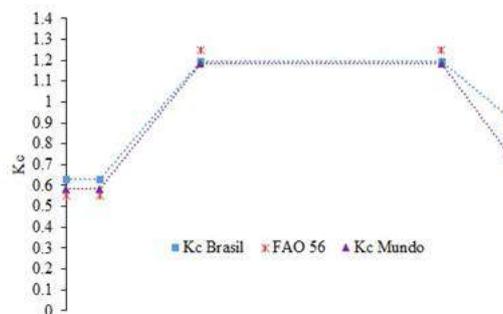


Figura 1. Valores médios de coeficiente de cultura (Kc) por fase fenológica da cana-de-açúcar, estimados a partir de 10 estudos no Brasil e 24 ao redor do mundo, e valores recomendados por Allen *et al.* (1998) no Boletim FAO 56.

26.5.4 Fator de disponibilidade hídrica

O fator de disponibilidade hídrica é o limite de depleção da água do solo a partir do qual um evento de irrigação será realizado. A sua escolha depende não só da sensibilidade da cultura ao estresse hídrico, mas também da estratégia de manejo.

Partindo de um solo na capacidade de campo, ou seja, com 100% da CTA disponível, a cana-de-açúcar absorverá água pelo sistema radicular e não sofrerá nenhum impacto na sua taxa de transpiração e vigor vegetativo até um determinado momento, que chamaremos de **1º Limite de Depleção**. A partir desse ponto, a planta começa a encontrar mais resistência para absorver água do solo, resultando em desaceleração da expansão e multiplicação celular, ou seja, do crescimento (INMAN-BAMBER, 2002), até chegar no **2º Limite de Depleção**. A partir daí, a planta continua extraindo água do solo, mas, a dificuldade de extração aumenta a tal ponto que, além de interromper completamente seu crescimento vegetativo, reduz a taxa de concentração de sacarose (INMAN-BAMBER, 2004; MACHADO *et al.*, 2009), até atingir um **3º Limite de Depleção**. Após esse 3º Limite, além da paralisação completa do crescimento vegetativo, a planta também cessa totalmente a concentração de açúcar nos colmos. Consequentemente, embora haja uma quantidade mínima de água disponível no solo, ela está retida em tensões tão elevadas que a planta não mais consegue absorvê-la. Desse momento em diante, com estômatos praticamente todos fechados e taxa de transpiração próxima a zero, a planta não produz mais energia suficiente para atender sua demanda. Então, para sobreviver e continuar respirando,

sobretudo em noites quentes, precisa utilizar das reservas de energia (açúcar) que havia acumulado em seus colmos (VAZQUEZ *et al.*, 1989). É o que chamamos de processo de inversão de sacarose e isoporização - perda de peso e qualidade do colmo (ARALDI *et al.*, 2010).

Na Tabela 2 são listados alguns valores de **f** para esses estágios de estresse hídrico, e que podem ser utilizados para definir a faixa de água disponível que se pretende utilizar na estratégia de manejo da irrigação. Os valores de **f** listados são, em sua maioria, determinados para condições de ETC média de aproximadamente 5 mm dia⁻¹. Para valores maiores e menores de ETC, Allen *et al.* (1998) sugere uma equação para correção do valor de *f*.

Tabela 2. Fator de disponibilidade hídrica (f) para cana-de-açúcar.

Fator de Disponibilidade Hídrica - f				
Faixa de Depleção da CTA	< 1º Limite	1º a 2º Limite	2 a 3º Limite	> 3º Limite
Impacto no desenvolvimento vegetativo	Máximo	Reduzido	Interrompido	Interrompido
Impacto no acúmulo de açúcar nos colmos	Máximo	Máximo	Reduzido	Interrompido
Doorenbos e Kassam (1979)	0,65	0,65	0,65	0,65
Allen <i>et al.</i> (1998)	0,65	0,65	0,65	0,65
Inmam-Bamber (2002)	< 0,26	0,26 - 0,57	0,57 - 0,65	> 0,65
Singels <i>et al.</i> (2010)	< 0,126	0,126 - 0,27	0,27 - 0,81	> 0,81
Singels e Laan (2012)	< 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7	> 0,7
Raes <i>et al.</i> (2018)	< 0,2	0,2 - 0,6	0,6 - 0,85	> 0,85
Santos <i>et al.</i> (2019)	< 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,8	> 0,85

26.5.5 Coeficiente de estresse hídrico

Os mecanismos morfológicos e fisiológicos utilizados pela cana-de-açúcar para se adaptar a condições de deficiência hídrica impactam na fração da ETC que se converte em ETr (HSIAO; ACEVEDO, 1974; INMAN-BAMBER *et al.*, 2012). O coeficiente de estresse hídrico (Ks) é utilizado para a estimativa dessa redução da ETr em relação à ETC. Se o valor de Ks for igual a 1, significa que toda a disponibilidade de água no solo permite que toda ETC seja convertida em ETr. Um Ks igual a zero implica que a disponibilidade de água no solo para planta está tão baixa que nada da ETC se converte em ETr. Na Tabela 3, são apresentados modelos de cálculo de Ks.

Tabela 3. Modelos de cálculo do coeficiente de estresse hídrico, K_s .

Coeficiente de Estresse Hídrico - K_s		
Referência	Equação	Descrição
Allen <i>et al.</i> (1998)	$K_s = \frac{CAD - D_r}{(1 - p)CAD}$	CAD = total de água disponível na zona radicular [mm]; D_r = depleção hídrica na zona radicular [mm]; p = fração da CAD que a cana-de-açúcar pode extrair antes do início do estresse hídrico.
Singels <i>et al.</i> (1998)	$K_s = F_s(1 - F_i)$	F_s = índice de umidade da superfície do solo; F_i = fração da cobertura do dossel.
Bernardo <i>et al.</i> (2019)	$K_s = \frac{\ln(LAA + 1)}{\ln(CRA + 1)}$	LAA = lâmina atual de água no solo [mm]; CRA = capacidade real de água no solo [mm].
Steduto <i>et al.</i> (2012)	$K_s = (0,28 - 0,18G - 0,03ET_0 + \left(\frac{3,8F(1 - F)}{ET_0}\right)(1 - wz))$	G = fração do solo coberta pelo dossel; ET_0 = evapotranspiração de referência; F = frequência mensal de dias chuvosos; wz = fração da superfície úmida do solo.

26.6 Estratégias de manejo

Para produção irrigada de cana-de-açúcar recomendamos a estratégia de **irrigação com deficit hídrico controlado**, também chamada de **irrigação deficitária**. Essa estratégia de otimização aplica irrigação durante as fases fenológicas de forma dinâmica, provendo maior atendimento da demanda nas fases em que a planta é mais sensível ao estresse hídrico. Fora desses períodos, a irrigação é total ou parcialmente suprimida, seja em função da maior tolerância da cultura ao estresse hídrico, seja porque a chuva já provê água suficiente para otimizar a produção. Essa prática, além de otimizar o TAH, também aumenta a PA e a sustentabilidade ambiental da produção irrigada frente à produção de sequeiro (ZHANG; OWEIS, 1999; FERERES; SORIANO, 2007).

Os limites físicos e fisiológicos que determinam o valor de **f** para cada fase fenológica não precisam ser os únicos considerados na definição do valor que será adotado, podendo a estratégia de manejo adotar valores ligeiramente maiores ou menores, seja por questões estratégicas ou econômicas. Por exemplo, o aprofundamento radicular de gramíneas, como a cana-de-açúcar, pode ser induzido através da prática de manejo criterioso de irrigação deficitária, permitindo um incremento gradativo do limite de depleção (ALLEN *et al.*, 1998). Se bem conduzida, essa prática pode aumentar a eficiência de uso de água e nutrientes do perfil do solo, aumentar a P_{ef} , e reduzir a demanda de irrigação.

Dentre as formas de aplicar o **deficit hídrico controlado** no manejo da irrigação, duas se destacam: (i) aumentar o valor de f adotado, permitindo um maior nível de depleção de água no solo antes de voltar a irrigar; e (ii) repor apenas parcialmente a irrigação total necessária (ITN - lâmina necessária para elevar a umidade atual até a capacidade de campo) toda vez que a umidade atingir o ponto **f**. A aplicação simultânea das duas estratégias também pode ser utilizada.

Se a estratégia de irrigação por **deficit hídrico controlado** for considerada desde a concepção do projeto de irrigação, a lâmina máxima diária que pode ser aplicada (lâmina de projeto) pode ser dimensionada de tal forma que atenda integralmente à demanda hídrica nas fases iniciais, mais críticas, e apenas uma fração

da demanda nas fases de maior requerimento, onde a cana-de-açúcar também é mais tolerante ao *deficit* hídrico. Essa estratégia otimiza a lâmina de projeto e, logo, o investimento na infraestrutura de irrigação.

Uma forma de dimensionar esse nível de *deficit* hídrico aplicado durante o ciclo da cultura é o % de redução da ETc. Ou seja, o percentual da ETc de todo o ciclo que, de modo controlado e proposital, não se transformará em ETr.

26.7 Estratégia de maturação (*drying-off*)

Cada variedade tem seu potencial genético para acúmulo de açúcar e seu padrão de curva de maturação (PEREIRA *et al.*, 2017). A fisiologia da maturação é um sistema belíssimo e complexo que também é influenciado por diversos outros processos (MARIN; NASSIF, 2013). Praticamente tudo que sinaliza para a planta que o seu ciclo de vida pode estar chegando ao fim ou que seu futuro está em perigo, engatilha processos fisiológicos que aceleram a maturação e o armazenamento de açúcar nos colmos. Declínio de temperatura e *deficit* hídrico são dois dos fatores que aceleram a curva de maturação (CASAROLI *et al.*, 2019).

Com temperatura favorável ao seu crescimento, se não houver restrição hídrica, a cultura continuará dedicando a maior parte de sua energia para produzir mais folhas e crescer. Isso ocorre tanto para cana de sequeiro como cana irrigada. Por essa razão, por exemplo, eventos de chuva fazem os valores de ATR (açúcar total recuperável, kg t⁻¹) caírem em canavial que está prestes a ser colhido (OLIVEIRA *et al.*, 2011). Por outro lado, temperatura excessivamente baixa e estresse hídrico por períodos muito prolongados fazem a cultura ultrapassar o ponto de maturação ótimo. Os processos fisiológicos da cana em sistema de sequeiro e irrigado são os mesmos, o que muda são o formato de suas curvas de maturação (CASAROLI *et al.*, 2019), da mesma forma como a curva de maturação da cana de sequeiro em um solo que armazena mais água é mais lenta do que a curva num solo arenoso (MAULE *et al.*, 2001). Ou seja, é necessário aprender o comportamento da curva de maturação de um canavial irrigado e, assim, como se faz em áreas de sequeiro, utilizar estratégias de manejo para otimizar a maturação e o momento de colheita. Chama-se *drying-off* (INMAM-BAMBER; SMITH, 2005) a estratégia de redução controlada da irrigação nos dias que antecedem a colheita, que resulta em maior *deficit* hídrico, interrompe o vigor vegetativo e a acelera a concentração de açúcar nos colmos.

Se o manejo da oferta de nutrientes não estiver compatível com o objetivo de interromper o crescimento vegetativo e otimizar a maturação, a estratégia de *drying-off* funcionará, mas de forma limitada.

Se o *drying-off* aplicado for demasiadamente moderado, o TCH será maximizado, mas não o ATR. Por outro lado, se for demasiadamente agressivo, o ATR será maximizado, mas o TCH pode ser reduzido além do adequado. Na verdade, sob condições de estresse hídrico excessivo, perde-se TCH e perde-se ATR. Por isso, o objetivo do *drying-off* não é maximizar nem o TCH, nem o ATR, mas o TAH.

O ganho de TAH com a aplicação da estratégia de *drying-off* já foi observado em várias áreas de produção (ROBERTSON; DONALDSON, 1998; INMAM-BAMBER; SMITH, 2005; OLIVIER *et al.*, 2006; BARBOSA *et al.*, 2012; BARBOSA *et al.*, 2013; HAGOS *et al.*, 2014; PIRES *et al.*, 2014; SILVA, 2014). Há relatos de até 18% de TAH em vários experimentos. Inman-Bamber (2004) reporta *drying-off* otimizado quando resulta na perda de 3 a 4 folhas por colmo. Robertson e Donaldson (1998), analisando resultados na África do Sul, identificaram ganhos médios de TAH de 8%, chegando até 15%.

Diversos autores tentam correlacionar a intensidade adequada do *drying-off* a um determinado número de dias de interrupção da irrigação antes da colheita. Hagos *et al.* (2014), na Etiópia, identificaram que 65 dias de *drying-off* favoreceu a variedade estudada. Em Guaíra, SP, Barbosa *et al.* (2012), Barbosa *et al.* (2013), e Pires *et al.* (2014) aplicaram *drying-off* de 45 a 75 dias para otimizar o TAH para variedade RB855536. Vieira *et al.* (2013), estudando a variedade RB86-7515 em Jaíba, MG, otimizaram o TAH com *drying-off* aplicado 7 dias antes do corte. Araújo *et al.* (2016) otimizaram o TAH para variedade CTC 4 em Santo Antônio de Goiás, GO, aplicando *drying-off* 30 dias antes da colheita. E Olivier e Singels (2015) otimizaram o TAH na África do Sul com *drying-off* de 20 a 40 dias. Comumente, no Brasil, produtores aplicam *drying-off* de 30 dias antes da colheita, independentemente da variedade, do padrão nutricional da lavoura, do uso de maturadores, do nível de água disponível no início do *drying-off*, do clima (ETo e temperatura) na fase de maturação, da profundidade radicular e da capacidade de retenção de água do solo. No entanto, o número de dias não é o método mais adequado para determinar a intensidade ótima do *drying-off*, justo por que não considera todas as variáveis que influenciam esse processo de maturação.

Inman-Bamber e Jager (1986) indicaram que a maturação ocorre quando o potencial de água na folha encontra-se entre -0,2 e -1,2 MPa. Robertson e Donaldson (1998) demonstraram que o TAH é maximizado quando o *drying-off* resulta em decréscimo inferior a 10% da matéria seca do colmo. Além desse limite, o TAH cai linearmente. Robertson *et al.* (1999) reportaram melhores resultados de TAH quando o *drying-off* aplicado produziu redução de 4 a 8% da matéria seca. Donaldson e Benzuidenhout (2000) afirmam que, na África do Sul, uma prática comum dos produtores era aplicar um *drying-off* equivalente a duas vezes a CTA. Mas, em seu trabalho, obtiveram otimização do *drying-off* quase sempre com múltiplos bem abaixo de 2 vezes a CTA. Para solos e alta retenção, os múltiplos se aproximaram de 1 e, nos solos de menor retenção, múltiplos de até 1,8. Singels *et al.* (2000) verificaram que o ATR foi favorecido quando o *drying-off* imprimiu níveis de disponibilidade relativa de água no solo abaixo de 55%. Este tipo de estratégia de mensuração da intensidade do *drying-off* - observação da planta e/ou do solo, pode auxiliar a tomada de decisão mais assertiva para otimização do TAH.

Vale ressaltar que a aplicação precisa da estratégia de *drying-off* também depende de que o clima após a interrupção da irrigação se comporte próximo da condição normal prevista. Eventos não esperados de chuva prejudicam a precisão da estratégia, sobretudo quando se pretende aplicá-la para colher o canavial no início ou final de safra. No meio da safra, quando há menor probabilidade de chuva nos dois meses que antecedem a colheita, há maior chance de executar com perfeição o *drying-off*.

No Cerrado, o período de *drying-off* pode oscilar entre 10 e 90 dias. Para uma variedade de curva de maturação menos acentuada, sob solo de elevada CTA, colhido no início da safra (temperaturas mais amenas e mais próximo ao final do período chuvoso), será necessário um maior número de dias de *drying-off* do que um canavial com variedade de curva de maturação mais acentuada, sob solo com menor CTA, colhido no final de agosto, quando a temperatura do ar é mais elevada e o nível de água disponível no solo já está muito reduzido.

Uma vantagem adicional do *drying-off* é a criação de melhores condições para o tráfego de máquinas na colheita, sem os efeitos de compactação e afundamento de entrelinha.

26.8 Recomendações para estimar a demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado

Nos últimos 10 anos, a equipe de pesquisa em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar da Embrapa Cerrados tem conduzido dezenas de experimentos dentro de usinas no Cerrado. Em todos esses experimentos, todas as práticas agronômicas para alto desempenho e operações são realizadas utilizando os mesmos insumos e maquinários empregados nas áreas comerciais dessas usinas. Esse aspecto é fundamental para aumentar a probabilidade de resultados da pesquisa serem replicáveis quando aplicados em área comercial. Além das dezenas de experimentos, a equipe também tem orientado e acompanhado o aperfeiçoamento da tecnologia e o manejo da irrigação em milhares de hectares sob esse sistema. Por isso, baseados na combinação do conhecimento científico e empírico acumulados pela equipe, indicamos na Tabela 4 um conjunto de parâmetros que tem proporcionado, até o momento, a melhor acurácia para estimativa de ETr e manejo de irrigação para produção de cana-de-açúcar no Cerrado. Os resultados de produtividade alcançados com esse conjunto de parâmetros serão descritos adiante no texto.

O uso da zona radicular indicada na Tabela 4 pressupõe a eliminação de barreiras químicas e físicas para o pleno desenvolvimento de raízes nessas profundidades, sobretudo quanto aos níveis de cálcio, magnésio e fósforo. Na fase de germinação, ajustes na profundidade de controle podem ser necessários em função do método de plantio (propagação vegetativa ou MPB) e em função da profundidade de sulcação. Recomenda-se um volume de controle inicial pelo menos 0,2 m abaixo da profundidade de plantio.

A partir da 1ª soca, e com exceção da fase de maturação, caso haja qualquer problema que implique no esgotamento total da camada de manejo, consideramos uma disponibilidade adicional de água equivalente a 30% da CTA. Em suma, essa estratégia considera que, além da zona escolhida para manejo da irrigação, existem algumas poucas raízes cordão que descem a camadas mais profundas do solo e que, em condições de estresse hídrico severo, são responsáveis pela absorção da maior quantidade de água utilizada pela planta (SMITH *et al.*, 2005; ARAÚJO, 2018). Na prática cotidiana do manejo de irrigação, trincheiras devem ser abertas eventualmente para verificação da distribuição radicular no perfil do solo.

Adotando práticas nutricionais de pré-maturação e o cálculo do *drying-off* equivalente ao consumo da CTA têm resultado, frequentemente, em valores de ATR superiores às áreas de sequeiro, comprovando o potencial do sistema irrigado de extrair melhor o potencial genético da cana. Com isso, além dos ganhos em TCH, um canavial irrigado e com manejo adequado de *drying-off* também pode entregar ganhos expressivos de ATR e, conseqüentemente, TAH.

Tabela 4. Parâmetros recomendados para estimativa de ETr e manejo de irrigação de cana-de-açúcar no Cerrado.

Fase Fenológica	I	II	III	IV
	Até 25% de cobertura do solo	25 a 100% de cobertura do solo	100% de cobertura do solo	100% de cobertura do solo
Germinação ou Brotação	Perfilhamento e Desenvolvimento Inicial	Desenvolvimento Pleno	Maturação (Drying-off)	
Coefficiente de Cultura - Kc				
Cana-planta e cana-soca	0,55	0,9	1,25	0,8
Fator de Disponibilidade Hídrica - f				
Cana-planta e Cana-soca	0,3	0,3	0,5	0,9
Modelo de cálculo de coeficiente de estresse - Ks				
Até ponto f	Ks = 1	Logarítmico, Bernardo <i>et al.</i> (2019)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)
Após ponto f	Logarítmico, Bernardo <i>et al.</i> (2019)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)	Linear, Allen <i>et al.</i> (1998)
Reposição da Irrigação Total Necessária (ITN), em %				
Cana-planta e Cana-soca	100	100	100 ¹	5
Profundidade da zona radicular de controle - z (m)²				
Cana Planta ³	0,3	0,4	0,5	1
1ª Soca	0,35	0,45	0,55	1,1
2ª Soca em diante	0,4	0,5	0,6	1,2

¹ Na Fase III, utiliza-se aplica-se 100% da ITN enquanto a demanda não supera a lâmina de projeto. Contudo, como recomenda-se estratégias de irrigação deficitária e lâminas de projeto para satisfação de 75% da ITN máxima simulada pelas normais climatológicas, em boa parte da Fase III o sistema não consegue satisfazer a demanda, gerando uma redução proposital da fração de ETC que se converte em ETR.

² O uso da zona radicular indicada na Tabela 4 pressupõe a eliminação de barreiras químicas e físicas para o pleno desenvolvimento de raízes nessas profundidades, sobretudo quanto aos níveis de cálcio, magnésio e fósforo.

³ Na fase de germinação, ajustes da profundidade de controle podem ser necessários em função do método de plantio (propagação vegetativa ou MPB) e em função da profundidade de sulcação. Recomenda-se um volume de controle inicial pelo menos 0,2m abaixo da profundidade de plantio.

As melhores respostas da cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção têm ocorrido quando aproximadamente 75% da ETC é convertida em ETr ao longo do ciclo. Ou seja, quando, ao final do ciclo, a ETr acumulada representa uma redução de aproximadamente 25% da ETC. Variedades menos responsivas à irrigação, e por isso não recomendadas, normalmente, atingem máxima produtividade em patamares inferiores a 75% de satisfação da ETC. Para se alcançar a redução recomendada de 25% ETC ao final do ciclo, um percentual maior que 75% da ETC é satisfeito nas fases fenológicas iniciais, e um percentual menor que 75% da ETC é satisfeito na fase fenológica de desenvolvimento pleno. Os parâmetros apontados na Tabela 4 devem propiciar o nível recomendado de irrigação deficitária para a maior parte da região produtora de cana-de-açúcar no Cerrado, sob condições climatológicas normais, e adotando o manejo agrônômico sugerido. Para condições diferentes das normais climatológicas, ou manejo agrônômico muito distinto do recomendado, ou em regiões

de transição do bioma Cerrado para outros biomas, os parâmetros precisam ser ajustados.

A deficiência hídrica na fase de maturação não é considerada no cômputo do alvo de redução da ETc, dado que, nessa fase a deficiência hídrica é induzida e benéfica.

26.9 Resposta produtiva da cana-de-açúcar ao sistema irrigado

É farta a literatura que demonstra a resposta produtiva da cana-de-açúcar sob sistema irrigado de produção. Na Figura 2, apresenta-se o resultado da compilação de dados oriundos de 42 publicações, sendo 16 relativas à experimentação em outros países, como África do Sul, Austrália, Suazilândia, Índia, China, Estados Unidos e Irã, e outras 26 oriundas de experimentação no Brasil. O experimento mais antigo da base de dados é de 1971 e, o mais recente, 2020. Do total de publicações, 17 referem-se a experimentações anteriores ao ano 2000, e 25 posteriores a esse ano. Resultados de cana-planta e cana-soca não foram separados nesta análise.

Na Figura 3, apresenta-se a resposta produtiva em experimento de longa duração conduzido pela Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia, GO, entre os anos de 2012 e 2020. Nesse experimento, 12 variedades foram submetidas ao primeiro protocolo de sistema irrigado proposto pela equipe de pesquisa, e detalhado a seguir: Irrigação por aspersão com molhamento de área total, tipo pivô central, e manejo da irrigação via clima, com aferição via solo. A correção de solo foi realizada para alcançar 70% de saturação por bases e a fosfatagem para atingir 15 ppm de P₂O₅ (resina). O preparo de solo incorporou os corretivos a 35 cm de profundidade com grade pesada. A gessagem foi calculada conforme Sousa *et al.* (2016). Adubações anuais com N, P e K, divididas em 3 parcelas foram aplicadas a lanço, em área total, sobre a superfície. A área não recebeu adubação corretiva de micronutrientes, nem adubação via água de irrigação, nem quimigação. Utilizou-se anualmente inibidor de florescimento, mas não maturadores. Aplicações anuais de 500 kg de calcário dolomítico e 400 kg de gesso foram realizadas imediatamente após cada corte. Todas as operações agrícolas, controle de erva-daninha e tratamentos fitossanitários foram realizadas empregando os mesmos métodos e maquinários adotados em área comercial de sequeiro da usina.

26.9.1 Toneladas de colmo por hectare

Na análise de dados de literatura (Figura 2A), tanto experimentações que antecedem o ano 2000 quanto posteriores, o TCH (toneladas de colmo por hectare) em sistema irrigado supera o sistema de sequeiro. O valor máximo de TCH nas experimentações anteriores ao ano 2000 excedia pouco as 140 toneladas, ao passo que, nas últimas duas décadas, esse patamar superou as 200 toneladas por hectare.

Antes de 2000, o ganho médio de TCH conferido pelo sistema irrigado era de 23,3 toneladas superior ao de sequeiro. Após 2000, o ganho médio do conjunto de experimentos alcançou 30,4 toneladas, um aumento de 30%. Esse aumento da diferença de TCH entre o sistema sequeiro e irrigado evidencia o ganho de domínio da tecnologia de sistema irrigado de produção. Esse avanço tecnológico também fica evidente ao observar a maior dispersão de resultados para o sistema irrigado após 2000. Confirmando a experiência empírica, os dados mostram que, quando não se domina o sistema irrigado de forma holística, os ganhos de TCH são marginais, ao passo que quando aplicado em elevado padrão de domínio, as diferenças são acentuadas, podendo entregar um TCH até 100% superior ao sequeiro.

Além de áreas experimentais, elevadas produtividades de cana-de-açúcar irrigadas por pivô central em solos com boa fertilidade têm sido reportadas. No Noroeste

e Norte Mineiro, Semiárido e Cerrado Nordestino, Noroeste e Sudoeste Goiano e Cerrado de São Paulo, são inúmeros os relatos de produtividade de canavial de 12 meses superando as 200 toneladas por hectare em áreas comerciais de usinas. Em algumas áreas da Usina Jalles Machado e Usina Otávio Lage, em Goianésia (GO) e em experimentação em Planaltina (DF) (BUFON *et al.*, 2013) também reportaram produtividades acima de 200 t ha⁻¹.

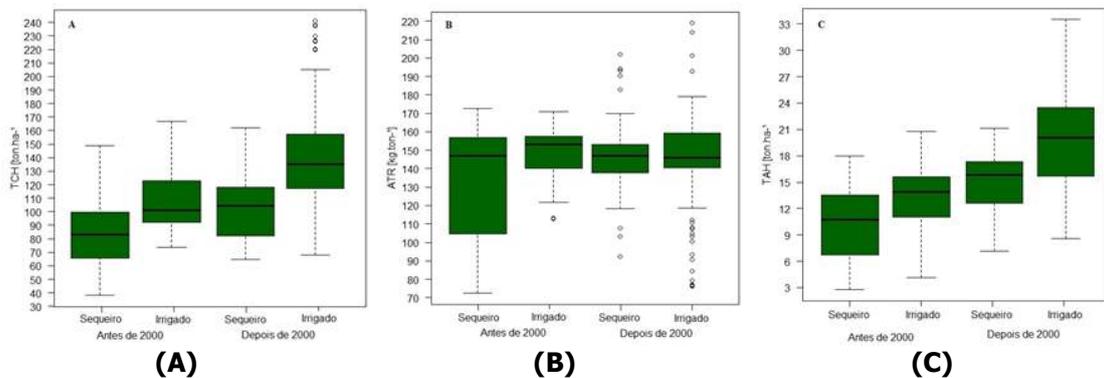


Figura 2. Valores de TCH (A), ATR (B) e TAH (C) de experimentos com cana-de-açúcar de sequeiro e irrigada em 17 estudos publicados no Brasil e no Mundo antes do ano 2000 e em 25 estudos posteriores ao ano 2000.

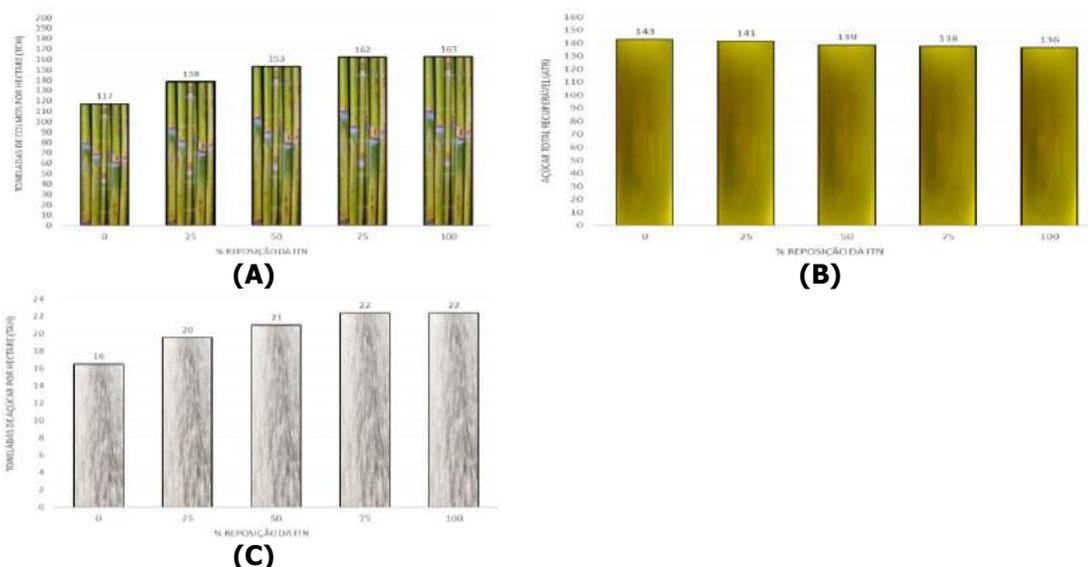


Figura 3. Resposta produtiva da cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectare (TCH) (A), açúcar total recuperável (ATR) (B) e toneladas de açúcar por hectare (TAH) (C), em experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, GO, quando submetida a sistema irrigado de produção. Os tratamentos refletem 5 níveis de reposição da irrigação total necessária (ITN), e sendo a testemunha (0% da ITN) conduzida em sequeiro e adicionada de uma lâmina de salvamento de 60mm aplicada imediatamente após a colheita. Resultados médios de 8 anos e 12 variedades, entre os anos de 2012 e 2020.

Na experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado (Figura 3A), a média acumulada de TCH para 8 cortes e 12 variedades atingiu-se 162 toneladas quando 75% da irrigação total necessária foi suprida. A variedade de menor responsividade, SP860042 atingiu média de 140 e, a mais responsiva, RB96 6928, atingiu 193 toneladas na média de 8 anos. De forma geral, incluindo variedades mais e

menos responsivas, o sistema irrigado produziu 45 toneladas de colmo por ano a mais que a produção de sequeiro, tendo algumas variedades entregado diferença superior a 60 toneladas na média de 8 anos.

26.9.2 Açúcar total recuperável

Adotando práticas nutricionais de pré-maturação e a estratégia de cálculo do *drying-off* equivalente a duas vezes a CTA do solo têm resultado, frequentemente, em valores de ATR superiores às áreas de sequeiro, comprovando o potencial do sistema irrigado de extrair melhor o potencial genético da cana. Com isso, além dos ganhos em TCH, um canavial irrigado e com manejo adequado de *drying-off* também pode entregar ganhos expressivos de ATR e, conseqüentemente, agregar TAH tanto pela massa de colmos quanto por sua qualidade.

Na curva de aprendizado em sistema irrigado de produção, normalmente, atinge-se a otimização de TCH antes de se dominar a otimização da maturação. Por essa razão, é esperado que, pelo menor entendimento do comportamento da curva de maturação das variedades em condição irrigada, o desempenho de ATR no sistema irrigado seja, com frequência, inferior ao da produção de sequeiro.

Nota-se na Figura 2B que, na média dos 42 experimentos analisados, sistemas irrigados auferiram valores de ATR semelhantes aos de sequeiro, ao redor de 145 kg t^{-1} . Mas, notadamente, a grande dispersão dos valores das experimentações posteriores a 2000 evidencia oportunidade de aprimoramento no domínio da técnica de *drying-off*.

Conforme apresentado na Figura 3B, a média acumulada de 8 cortes e 12 variedades, atingiu-se um ATR de 138 kg t^{-1} quando 75% da irrigação total necessária foi suprida, 5 kg abaixo do valor médio em sequeiro. Esse experimento foi conduzido entre 2012 a 2020 e, durante os 5 primeiros anos, até que a equipe dominasse melhor o *drying-off*, perdas de ATR ocorreram. Nos últimos 3 anos, os valores de ATR do sistema irrigado foram, no mínimo, iguais aos alcançados no sequeiro. Após a equipe ter dominado melhor a prática de *drying-off* (vide orientações na seção anterior) o padrão de valores de ATR iguais ou superiores às áreas de sequeiro tem se repetido na rede de experimentos que a Embrapa Cerrados conduz em diversas parceiras usinas do Cerrado.

26.9.3 Toneladas de açúcar por hectare

A análise das 42 publicações (Figura 2C) mostra que o valor médio de TAH (toneladas de açúcar por hectare) em sistema irrigado antes do ano 2000 era de, aproximadamente, 15 toneladas, ao passo que, nas últimas duas décadas, a média ultrapassou 20 toneladas e, com frequência, atingiu TAH acima de 30.

Tanto nas experimentações que antecedem o ano 2000 quanto nas posteriores, o TAH no sistema irrigado supera o sistema de sequeiro. Antes de 2000, na média dos experimentos, o sistema irrigado produziu TAH aproximadamente 3 toneladas superior ao sequeiro. Após 2000, o sistema irrigado produziu quase 6 toneladas, ou seja, 100% a mais que o sequeiro. Frequentemente, essas respostas chegam a incrementos de mais de 10 toneladas de açúcar por ano.

O aumento na diferença de TAH entre o sistema sequeiro e irrigado ao longo dos anos também evidencia o ganho de domínio tecnológico do sistema irrigado de produção. Assim como para o TCH, esse avanço tecnológico também fica evidente ao observar a maior dispersão de resultados de TAH para o sistema irrigado após 2000, confirmando observação empírica da equipe da Embrapa Cerrados.

A Figura 3C apresenta o resultado de TAH em experimentação conduzida pela Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia (GO). Na média acumulada de 8 cortes e 12 variedades, atingiu-se um TAH de 22 quando 75% da irrigação total necessária foi suprida. Na média dos 8 anos e 12 variedades, o sistema irrigado produziu anualmente 6 toneladas a mais de TAH que o sequeiro. Para algumas variedades essa diferença foi superior a 8 toneladas de açúcar. Com a experiência de *drying-off* acumulada até o momento, e baseando-se nos resultados dos últimos 3 anos, acredita-se que essa diferença pode facilmente ultrapassar 10 toneladas de açúcar por ano.

26.9.4 Produtividade da água

Em razão dos ganhos de produtividade do sistema irrigado de produção, tanto em relação a TCH quanto TAH, a produção irrigada pode ser mais eficiente no uso da água do que a produção de sequeiro (MOLDEN; OWEIS, 2010; CALGARO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013; BUFON *et al.*, 2014; OLIVER; SINGELS, 2015; SINGH, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019).

Segundo Olivier e Singels (2015), estudos relacionados à PA (produtividade da água) na cana-de-açúcar ao redor do mundo reportam valores variando normalmente entre 6 a 12 kg m⁻³. Mas, enquanto observando quatro ciclos (planta e 3 socas) na África do Sul, Olivier e Singels (2015) verificaram PA entre 7 a 13 kg m⁻³, e que a manutenção da palhada e o manejo criterioso da irrigação favoreceram os valores mais altos.

No Brasil, vários trabalhos apresentaram resultados de PA no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar (CALGARO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2013; BUFON *et al.*, 2014) encontrando valores entre 7,2 e 14,2 kg m⁻³.

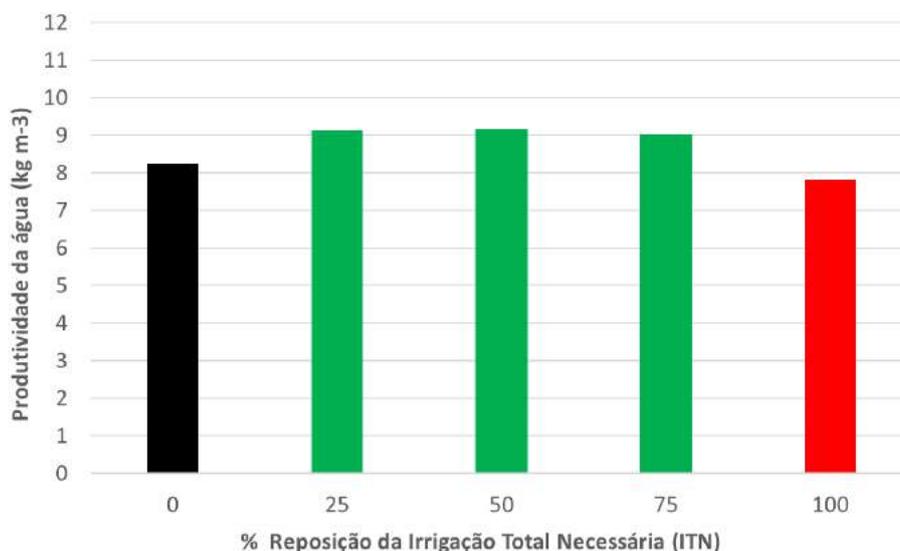


Figura 4. Produtividade da água (PA) de cana-de-açúcar, em kg m⁻³, em experimentação da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, GO, quando submetida a sistema irrigado de produção. Os tratamentos refletem 5 níveis de reposição da irrigação total necessária (ITN), sendo a testemunha (0% da ITN) conduzida em sequeiro e adicionada de uma lâmina de salvamento de 60 mm aplicada imediatamente após a colheita. Resultados médios de 8 anos e 12 variedades, entre os anos de 2012 e 2020.

O resultado dos experimentos de longa duração da Embrapa Cerrados na Usina Jalles Machado, Goianésia (GO) (Figura 4) indicam que, com exceção da estratégia de atendimento de 100% da irrigação total necessária, todas estratégias de irrigação

deficitária resultaram em ganhos de PA, geralmente superiores a 15%. Para as variedades mais responsivas, estratégias de irrigação deficitária frequentemente auferiram ganhos de PA superiores a 50%.

26.10 Plano de investimentos em produção irrigada

O Plano de Investimentos em Produção irrigada deve garantir, simultaneamente, a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos e a otimização dos investimentos em sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. Normalmente, esse plano passa por três etapas: (i) inventário de disponibilidade hídrica e aptidão, (ii) planejamento hídrico estratégico, e (iii) plano diretor de investimentos.

A primeira etapa Inventário de disponibilidade hídrica e aptidão levanta toda vazão outorgada e outorgável dentro dos limites da usina, e classifica suas áreas quanto a aptidão edafoclimática e logística para receberem um sistema irrigado de produção.

Na segunda etapa, elabora-se o Plano Hídrico Estratégico, que define como será utilizada a disponibilidade hídrica para verticalizar a produção. Nessa etapa, define-se quais talhões receberão o sistema irrigado, e qual será a época de colheita e a produtividade esperada de cada um deles. Esse processo define o papel de cada talhão sob sistema irrigado na estratégia global da usina. Com essas informações, define-se a demanda hídrica que deverá ser suplementada em cada área. Cada nível de satisfação hídrica e produtividade esperada gera um protocolo agrônômico e premissas de projeto de irrigação.

Normalmente, devido à limitação de recursos hídricos, a estratégia caminha para lastrear uma fração da produção da usina sob sistema irrigado, onde será mitigado o risco climático, e o restante da usina é direcionada para o sistema de sequeiro. Nesse caso, da área total demandada para moagem, a fração com piores solos, e as piores janelas de plantio e colheita são direcionadas para produção irrigada, muito menos sensível a esses fatores. E as melhores áreas, janelas de plantio e colheita são direcionadas para fração em sistema de sequeiro. Dessa forma, os investimentos na fração irrigada geram um impacto positivo também na área de sequeiro.

Mesmo nos casos excepcionais em que a disponibilidade hídrica permite que a totalidade da área da usina esteja sob produção irrigada, o planejamento hídrico estratégico ainda é fundamental. Nesse caso, em função da época de colheita e produtividade alvo de cada área, ainda será necessário ordenar os talhões por nível de demanda hídrica e, conseqüentemente, orientar protocolos agrônômicos e premissas de projeto de irrigação específicos para cada nível.

A terceira etapa é o plano diretor de investimentos em sistema irrigado. No plano diretor, estrutura-se a estratégia e velocidade de implementação, faz-se análise preliminar de viabilidade financeira, e estrutura-se o ordenamento dos investimentos por prioridades. Nesta etapa, projetos básicos de engenharia e análises de fluxo de caixa para áreas individuais podem ser necessários para subsidiar e direcionar a priorização das áreas que receberão primeiro o sistema irrigado.

Uma questão recorrente e controversa durante a fase de planejamento hídrico estratégico diz respeito à priorização para o sistema irrigado de canais colhidos no início, meio ou final da safra. Há casos de projetos e usinas com a totalidade de sua área irrigada e que, por isso, não precisam fazer essa escolha. Mas esses casos são exceção. Na maior parte dos casos será necessário decidir qual canal irrigar, seja por limitação financeira para investir em irrigação, seja por limitação de disponibilidade hídrica.

Normalmente, prioriza-se o canavial de final de safra, dada a maior deficiência hídrica e quebra da produtividade em áreas de sequeiro colhidas nesse período (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; CARVALHO *et al.*, 2019). Contudo, alguns resultados experimentais também podem embasar uma estratégia diferente.

Primeiramente, as evidências de campo mostram que, na verdade, no longo prazo, os maiores ganhos de produtividade (TAH) não estão associados à decisão de que canavial se escolhe irrigar (início, meio ou final de safra), mas do domínio do sistema de produção irrigado, o que passa pela seleção da variedade, da adoção das melhores estratégias de manejo da irrigação, da fertilidade e do trato fitossanitário.

Segundo, porque a maior probabilidade de acerto na estratégia de *drying-off* está em canavial irrigado de meio de safra, pela menor probabilidade de ser afetada por evento de chuva inesperada.

Em terceiro lugar, quando a usina está realizando os primeiros investimentos em produção irrigada e depende do retorno financeiro de um projeto específico para custear os demais, ao invés de olhar a estratégia geral da usina, pode preferir analisar a área irrigada como um projeto financeiro em si mesmo - quase com um CNPJ próprio, almejando que a área entregue o maior retorno financeiro possível, sem compará-la a uma área de sequeiro. Quando essa visão predomina, é inevitável perceber que, se por um lado a diferença de TAH entre sequeiro e irrigado é maior no final de safra, por outro lado, o custo do projeto de irrigação também aumenta à medida que se avança na safra, dado que a deficiência hídrica aumenta. Por isso, o melhor retorno financeiro por tonelada de cana (ou de açúcar) pode ser superior em canavial colhido no início ou meio de safra.

Em quarto lugar, pode-se considerar que, ao se direcionar os piores solos para produção irrigada em início e meio de safra, também se obterá ganho de produtividade no canavial de sequeiro colhido em final de safra que migrar para solos melhores e melhores janelas de plantio.

Em quinto lugar, considerando que a grande maioria das usinas no Brasil não possui experiência com sistemas modernos de produção irrigada de cana e que o aprendizado dessa tecnologia necessita de algum tempo e experiência prática, pode-se concluir ser mais fácil começar a dominar a tecnologia com um canavial irrigado para colheita no meio da safra, onde a probabilidade de acerto do *drying-off* é maior. Por essas razões, entendemos que o início da curva de aprendizado do sistema irrigado de produção de cana para a maioria das usinas pode ser facilitado com a escolha de canaviais de meio da safra, entre o início de julho e, no mais tardar, até a primeira quinzena de agosto.

26.11 Viabilidade econômica

Primeiramente, é fundamental perguntar se haverá sustentabilidade econômica para o setor sucroenergético brasileiro caso continue produzindo nos moldes atuais, com produção de sequeiro. A resposta para essa pergunta pode ser negativa, dada a tendência de redução e volatilidade de preços de *commodities* agrícolas (CASHIN *et al.*, 2002), os riscos climáticos crescentes (MARIN; NASSIF, 2013; ZILLI *et al.*, 2020) e os avanços tecnológicos e de eficiência experimentados pela concorrência, como o açúcar de beterraba (RAJAEIFAR *et al.*, 2019), o etanol de milho (OLIVEIRA *et al.*, 2018), os carros elétricos (SCHIMIDT *et al.*, 2011), entre outros.

Por isso, é urgente a verticalização do setor sucroenergético brasileiro, elevando cada vez mais sua eficiência e reduzindo custos de insumos, terra, e outros recursos naturais. Para isso, atualmente, não há estratégia melhor do que a conversão de fração

produção de cana-de-açúcar de sequeiro para o sistema irrigado. Hoje, essa é a única alternativa prontamente disponível para mudar substancialmente, em curto e médio prazo, os patamares de produtividade e o custo do setor sucroenergético brasileiro.

No Brasil, com boa gestão, há recursos hídricos abundantes para isso (MULTSCH *et al.*, 2020). Também está disponível as melhores tecnologias do mundo para engenharia e manejo de irrigação. Resta a intensificação da colaboração entre instituições de pesquisa, empresas de irrigação e setor produtivo para continuar desenvolvendo, comunicar, capacitar e evidenciar ainda mais a viabilidade técnica e econômica dessa estratégia. Diversos grupos e produtores que são referência em inovação tecnológica na produção sucroenergética já caminham a passos largos nessa direção – muitos até com estratégias sigilosas para acentuar sua vantagem competitiva. Mas é importante que esse seja um movimento de todo o setor e não apenas de poucos grupos.

Um erro recorrente ao avaliar a viabilidade econômica de sistemas irrigados é considerar única e exclusivamente o ganho de produtividade de colmos. De fato, o ganho de TCH é muito importante pois, além de aumentar receita, dilui os custos por tonelada produzida. Mas, com estressado ao longo deste capítulo, há muito mais vantagens.

Vale destacar que, no sistema irrigado, é possível atingir níveis de ATR iguais ou superiores a áreas de sequeiro. Por isso, aumenta-se substancialmente a produção de TAH, tanto pelo aumento de TCH quanto pelo aumento de ATR.

Além do aumento de receita direta e diluição de custos por unidade produzida, ainda há redução de custos por ganho de eficiência operacional nas principais, senão todas, operações agrícolas.

Pode-se destacar a redução do custo de plantio e preparo e custo da terra, um dos maiores custos da fase agrícola. No final de um ciclo de 10-12 anos de produção irrigada, se produz mais TAH do que se essa fosse uma área de sequeiro. Ganha-se no TAH anual e no acumulado em razão da maior longevidade. Conseqüentemente, haverá mais TAH para diluir o custo de plantio e custo da terra. Ou seja, custo da terra, custo de preparo e custo de plantio por TAH também são menores no sistema irrigado.

Há ainda os ganhos de eficiência nas outras operações agrícolas. A operação em menor área para produzir a mesma quantidade de açúcar reduz os custos de capital (inclusive maquinário), de mão-de-obra, administrativo, etc. Ainda pode-se considerar as facilidades e ganhos de eficiência na gestão ocasionadas pela redução da área.

Deve-se ainda considerar o ganho de produtividade, longevidade e redução de custos das áreas de sequeiro, que migram para os melhores ambientes e janelas de plantio da usina à medida que os piores ambientes e janelas de plantio são absorvidos pelo sistema irrigado.

Por fim, a maior produtividade eleva a eficiência das colhedoras por hora trabalhada e reduz as distâncias percorridas por colhedoras, transbordos e carretas para atender a moagem da usina. Ou seja, a verticalização das áreas com sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar resulta em aumento de eficiência e redução acentuada de um dos principais custos do setor, o CTT.

Dito isso, considerando apenas os ganhos diretos (sem contar os vários ganhos indiretos apontados acima), calculamos um *payback* aproximado de três anos para o investimento em sistema irrigado de produção. Depois desse prazo, o produtor terá pelo menos mais 7 a 9 anos de vida útil de equipamento para usufruir dos ganhos do sistema irrigado. Variações ocorrerão em função da natureza de cada projeto.

26.12 Considerações finais

Os dois argumentos mais relevantes contra a viabilidade econômica, na verdade, não têm relação com a viabilidade do sistema em si. O primeiro argumento é a falta de domínio da tecnologia para extrair seu potencial. Como em qualquer outro sistema, a única solução é buscar apoio técnico e começar a exercitar o sistema de produção irrigada em uma pequena fração de sua área – evoluindo na curva de aprendizado e domínio tecnológico. Como esse aprendizado demanda tempo, não começar o quanto antes pode custar a sobrevivência do negócio. O segundo argumento relevante é a fragilidade financeira para iniciar os investimentos em sistemas de irrigação. Para isso, não há outra solução além de estruturar um Plano de Investimentos em Sistema Irrigado, incluindo as etapas do inventário de disponibilidade hídrica, planejamento hídrico estratégico e plano diretor de investimentos. Também é uma estratégia viável utilizar os ganhos das primeiras etapas de investimento em produção irrigada para custear a expansão para novas áreas irrigadas. Isso é mais plausível do que imaginar que a expansão da área irrigada será custeada pelos ganhos incertos da área de sequeiro.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, **Irrigation and drainage paper**, 56, 300p., 1998.

APARECIDO, L.E.O.; MENESES, K.C.; TORSONI, G.B.; MORAES, J.R.S.C.; MESQUITA, D.Z. Accuracy of potential evapotranspiration models in different time scales. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.63-80, 2020.

ARALDI, R.; SILVA, F.M.L.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, n.3, p.694-702, 2010.

ARAÚJO, L.G. **Gesso Agrícola na cana-de-Açúcar: Produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2018.

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.19, p.952-958, 2012.

BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SILVA, T.J.A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6, p.588-594, 2013.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de Irrigação**, 9 Ed., Viçosa, UFV, 545p., 2019.

BHUIYAN, M.Z.I.; WANG, S.; CARTER, J.; RAKA, T.M. Calibration and assessment of capacitance based soil moisture sensors. Geo-Congress, p.754-766, 2020.

BOSQUILIA, R.W.D.; NEALE, C.M.U.; DUARTE, S.N.; LONGHI, S.J.; FERRAZ, S.F.B.; MULLER-KARGER, F.E. Evaluation of evapotranspiration variations according to soil type using multivariate statistical analysis. **Geoderma**, v.355, n.1, p.1-11, 2019.

BUFON, V.B.; FONTOURA, P.; BRENN, R.; ZUKETTA, R.; MESQUITA, J.; FEITOSA, W. Sugarcane in the Brazilian Savanna (Cerrado): Effects of irrigation on biomass production and water use efficiency. American Society of Biological and Agricultural Engineering. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. Montreal, Canada, 2014.

- BUFON, V.B.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, J.M.; *et al.* Acúmulo e partição de biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos na região do cerrado. **STAB**, p.178-183, 2016.
- BUFON, V.B.; MESQUITA, J.; ZUKETTA, R.; BATISTA, L.T.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. Sugarcane in the Brazilian Savanna (Cerrado): Effects of irrigation on biomass production and partitioning. American Society of Biological and Agricultural Engineering. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. Kansas City, 2013.
- CABRAL, O.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v.4, p.555-565, 2012.
- CABRAL, O.M.R.; DA ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; FREITAS, H.C.; LIGO, M.A.V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (Cerrado) in southeast Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.4, n.PB, p.22-40, 2015.
- CALGARO, M.; SIMÕES, W.L.; PINTO, J.M.; BRAGA, M.B.; SOARES, J.M.; SOUZA, M.A. de; LIMA, J.A. Eficiência do uso da água de irrigação em dois sistemas de cultivo de cana-de-açúcar de segunda soca no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 23, Luís Eduardo Magalhães. **Anais**, 2013.
- CARR, M.K.V; KNOX, J.W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. **Experimental Agriculture**, v.47, n.1, p.1-25, 2011.
- CARVALHO, T.B.; RESENDE, R.S.; RODRIGUES, R. Water use efficiency in the sugarcane cropping in different planting dates in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v.14, n.18, p.794-800, 2019.
- CASAROLI, D.; ALVES JÚNIOR, J. A.; EVANGELISTA, A. W. P. Quantitative and qualitative analysis of sugarcane productivity in function of air temperature and water stress. **Comunicata Scientiae**, v.10, n.1, p.203-212, 2019.
- CASHIN, P.; McDERMOTT, J. The long-run behavior of commodity prices: small trends and big variability. **IMF Staff Papers** v.49, n.2, p.1-25, 2002.
- CLEMENTE, P.R.A.; BEZERRA, B.K.L.; SILVA, V.S.G.; SANTOS, J.C.M.; ENDRES, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.1, p.100-117, 2017.
- CUNHA, F.F.; RAMOS, M.M.; ALENCAR, C.A.B. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.2, p.351-357, 2010.
- DONALDSON, R.; BEZUIDENHOUT, C. Determining the maximum drying off periods for sugarcane grown in different regions of the South African industry. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, v.74, n.1, p.162-166, 2000.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, n.33, 1979.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.Y.; GHEYI, H.R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v.28, n.3, p.494-506, 2008.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.
- FRANCISCO, P.R.M.; GUIMARÃES, C.L.; SABOYA, L.M.F.; DANTAS NETO, J.; SANTOS, D. Aptidão climática da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.10, n.3, p.676-686, 2016.
- HAGOS, H.; WORKU, W.; TAKELE, A. Effect of drying off period and harvest age on quality and yield of ratoon cane (*Saccharum officinarum* L.). **Advances in Crop Science and Technology**, v.2, n.3, p.5, 2014.

HSIAO, T.C.; ACEVEDO, E. Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. **Agricultural Meteorology**, v.14, p.59-84, 1974.

INMAN-BAMBER, N.G. Crop response to water stress. In: BRUCE, R. **Best Practice Irrigation in Sugarcane Production Short Course**. Course Manual. Townsville. 229p. 2002.

INMAN-BAMBER, N.G. Efficient use of water resources in sugar production: a physiological basis for crop response to water supply. **Sugar Research Australia**, p.39, 1999.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G.; JAGER, M. Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature in field grown sugarcane. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, p.156-161, 1986.

INMAN-BAMBER, N.G.; SINGELS, A.; MUCHOW, R.C. A systems approach to benchmarking for sugarcane production in Australia and South Africa. **Proceeding of South African Sugarcane Technologists' Association**, v.72, p.3-9, 1998.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.185-202, 2005.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v.144, p.351-360, 2009.

LEÃO, T.P.; COSTA, B.F.D.; BUFON, V.B.; ARAGÓN, F.F.H. Using time domain reflectometry to estimate water content of three soil orders under savanna in Brazil. **Geoderma Regional**, v.21, p.13, 2020.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao *deficit* hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MARIN, F.; NASSIF, D.S.P. Climate change and the sugarcane in Brazilian: Physiology, conjuncture and future scenario. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.232-239, 2013.

MARIN, F.R.; INMAN-BAMBER, G.; SILVA, T.G.F. Evapotranspiration and irrigation requirements in tropical climates. **Theoretical and Applied Climatology**, v.140, n.3-4, p.1349-1357, 2020.

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA, G.B. Productivity of sugarcane cultivars in different soils and harvesting periods. **Scientia Agricola**, v.58, n.2, p.295-301, 2001.

MOLDEN, D.; OWEIS, T. STEDUTO, P.; BINDRABAN, P.; HANJRA, M.A.; KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v.97, p.528-535, 2010.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v.16, n.3, p.264-276, 2014.

MULTSCH, S.; KROL, M.S.; PAHLOW, M. Assessment of potential implications of agricultural irrigation policy on surface water scarcity in Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.24, n.1, p.307-324, 2020.

OHASHI, P.; PIRES, D.M.; RIBEIRO, R.V.; SILVA, A.L.B.O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, v.74, n.2, p.131-138, 2015.

OLIVEIRA, F.M.; ASPIAZU, I.; KONDO, M.K.; BORGES, I.D.; PEGORARO, R.F.; VIANNA, E.J. Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. **Revista Ceres**, v.59, n.6, p.832-840, 2012.

- OLIVEIRA, L.A.; MIRANDA, J.H.; COOKE, R.A.C. Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.201, p.199-206, 2018.
- OLIVIER, F.C.; DONALDSON, R.A.; SINGELS, A. Drying off sugarcane on soils with low water holding capacity. **Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association**, v.80, n.1, p.183-187, 2006.
- OLIVIER, F.; SINGELS, A. A database of crop water use coefficients for irrigation scheduling of sugarcane. **Proceedings South Africa Sugarcane Technology Association** v.75 p.81-83. 2001.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. **Field Crops Research**, v.80, n.1, p.87-98, 2015.
- PEREIRA, L.F.M.; FERREIRA, V.M.; OLIVEIRA, N.G. Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. In: Academia Brasileira de Ciências. **Anais**. v.89, n.2, p.1231-1242, 2017.
- PINCELLI, R.P.; SILVA, M.D.A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v.28, n.4, p.546-556, 2012.
- PIRES, R.C.M.; BARBOSA, E.A.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; SILVA, T.J.A. Effects of subsurface drip irrigation and different planting arrangements on the yields and technological quality of sugarcane. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.9, p.1-7, 2014.
- PRADO, H.; VAN LIER, Q.J.; LANDELL, M.G.A.; VASCONCELOS, A.C.M. Classes de disponibilidade de água para cana-de-açúcar nos principais solos. 2018. Disponível em: https://www.pedologiafacil.com.br/artig_4.php. Acesso em: 13 mai. 2021.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference manual**. FAO, May, p.302, 2018. Disponível em: www.fao.org/publications. Acesso em: 1 abr. 2021.
- RAJAEIFAR, M.A.; SADEGHZADEH HEMAYATI, S.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; MAHMOUDI, S.B. A review on beet sugar industry with a focus on implementation of waste-to-energy strategy for power supply. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.103, January, p.423-442, 2019.
- ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off of sugarcane before harvest. **Field Crops Research**, v.55, p.201-208, 1998.
- ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, v.64, p.211-227, 1999.
- ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; DONALDSON, R.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; WOOD, A.W. Estimating the risk associated with drying-off strategies for irrigated sugarcane before harvest. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.50, p.65-78, 1999.
- SANTOS, J.M. **Índice de área foliar de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos no cerrado**. 121p. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- SCHMIDT, J.; GASS, V.; SCHMID, E. Land use changes, greenhouse gas emissions and fossil fuel substitution of biofuels compared to bioelectricity production for electric cars in Austria. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.9, p.4060-4074, 2011.
- SCHWARTZ, R.C.; EVETT, S.R.; ANDERSON, S.K.; ANDERSON, D. Evaluation of a direct-coupled time-domain reflectometry for determination of soil water content and bulk electrical conductivity. **Vadose Zone Journal**, v.15, n.1, p.1-8, 2016.
- SCHWARTZ, R.C.; EVETT, S.R.; DOMÍNGUEZ, A.; LÉLLIS, B.C.; PARDO, J.J. Soil water and bulk electrical conductivity sensor technologies for irrigation and salinity management. In: Joint

- FAO/IAEA Programme (Org.). Landscape Salinity and Water Management for Improving Agricultural Productivity. Vienna: International Atomic Energy Agency, p.121-146, 2020.
- SILVA, A.L.B.O. **Produção e eficiência no uso da água de quatro cultivares de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial em Campinas, SP**. 45p., 2014. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Campinas: IAC, 2014.
- SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G.; SANTOS, C.M.; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **Journal of Agricultural Science**, v.152, n.1, p.104-118, 2014.
- SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I. Economic depth of drip irrigation on sugarcane. **Irriga**, v.1, n.2, p.37-46, 2015.
- SILVA, V.P.R.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGES, C.J.R.; SOUSA, I.F.; DANTAS NETO, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.128, p.102-109, 2013.
- SINGELS, A.; LAAN, M. Sugarcane. In: STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES D. (Ed.), Crop yield response to water (p.174-180). Rome: FAO, **Irrigation and Drainage Paper**, n.66, 2012.
- SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. The effect of water stress on sugarcane biomass accumulation and partitioning. **Proceedings of South African Sugar Technologists' Association**, v.74, p.169-172, 2000.
- SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N.I. A simple computerized irrigation scheduling method for sugarcane. **Proceedings of South African Sugar Technologists' Association**, v.72, p.117-122, 1998.
- SINGELS, A.; VAN DEN BERG, M.; SMIT, M.A.; JONES, M.R.; VAN ANTWERPEN, R. Modelling water uptake, growth and sucrose accumulation of sugarcane subjected to water stress. **Field Crops Research**, v.117, n.1, p.59-69, 2010.
- SINGH, I. Growth, yield, irrigation water use efficiency, juice quality and economics of sugarcane under different irrigation scheduling. **Sugar Tech**, v.20, n.1, p.29-35, 2018.
- SMIT, A.L.; GEORGE, E.; GROENWOLD, J. Root observations and measurements at transparent interfaces with soil. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Ed.), **Root methods: A handbook**. Berlin: Springer-Verlag, p.235-271, 2000.
- SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.
- SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.
- VAZQUEZ, M.; TEREZA, M.; RAMOS, B. Influência da deficiência hídrica no florescimento e características tecnológicas da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.4, p.461-466, 1989.
- VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DELAZARI, F.T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, v.18, n.3, p.426-441, 2013.
- VINÍCIUS, M.P.; SILVA, J.F.; SILVA, E.D.S.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S.; MOUSINHO, F.E.P. Parâmetros fisiológicos de variedades de cana-de-açúcar submetidas a distintos regimes hídricos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, n.4, p.509-518, 2017.
- ZHANG, H.; OWEIS, T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v.38, p.195-211, 1999.
- ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A.C. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v.740, p.1-32, 2020.

POSFÁCIO

A Universidade de São Paulo – USP, através da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao publicar *Diferentes Abordagens Sobre Agricultura Irrigada no Brasil*, abordando história, política pública, economia, recurso hídrico, técnica e cultura, além de unir textos produzidos pelos mais qualificados profissionais envolvidos nos respectivos temas, presta dupla e relevantes homenagens: Comemora os 120 anos de criação da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, responsável pela formação de excelentes profissionais, pesquisadores e especialistas na área da agricultura, verdadeira fábrica de conhecimento, e reconhece o extraordinário legado do Ex-Ministro Alysso Paolinelli.

Além de muito justas homenagens, visto que o Ex-Ministro Alysso Paolinelli foi incontestavelmente um dos maiores defensores da agricultura irrigada brasileira, demonstrado por toda sua vida profissional e política, o conteúdo do presente livro, elaborado com a contribuição de 100 autoridades no tema, trata-se de um verdadeiro instrumento de orientação aos profissionais que atuam no setor bem como os gestores públicos responsáveis pelas políticas e ações voltadas para a agricultura irrigada.

O Ministério do Desenvolvimento Regional, responsável pela Política Nacional de Irrigação, reconhece a dimensão e importância da atividade e os desafios postos no cenário atual, como promover a ampliação da área irrigada no Brasil, de 7 milhões de hectares, para 15 milhões de hectares nos próximos 30 anos. Para isso, o Ministério de Desenvolvimento Regional – MDR, tem atuado firmemente na celebração de importantes parcerias com os demais órgãos como o Ministério da Agricultura, Pecuária e Pesca - Mapa, Embrapa, Conab, Incra, nossas coligadas, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, Codevasf, DNOCS, etc., no sentido de buscar as alternativas que permitam estabelecer os direcionamentos necessários ao desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil.

Recentemente, por meio de uma parceria com a Universidade Federal de Viçosa, foram iniciados os trabalhos para implantação do Sistema Nacional de Informações de Irrigação – SINIR, atendendo ao disposto na Lei 12.787, de 11/01/2013, plataforma que abrigará todo conteúdo relativo à localização das áreas irrigadas, dimensões, culturas, produção, responsáveis, etc., importante instrumento para orientar as decisões de governo bem como a iniciativa privada.

Por outro lado, o MDR vem atuando fortemente na estruturação da Segurança Hídrica, fundamental para uma irrigação sustentável, desenvolvendo estudos e projetos voltados para recuperação de bacias hidrográficas, nascentes de rios e mananciais, como a criação do projeto, também lançado recentemente, chamado “Águas Brasileiras”, com o objetivo de conscientizar a população sobre a necessidade de recuperar as nascentes das principais bacias hidrográficas brasileiras, garantindo a boa qualidade da água de nossos rios para as futuras gerações, ao mesmo tempo em que atraímos grandes empresas privadas para investir na recuperação de nascentes degradadas, bem como na sua manutenção, em troca da promoção da imagem no conceito de empresas que preservam e respeitam o meio ambiente.

O crescimento do agronegócio brasileiro decorrente do aumento da produtividade tem despertado os concorrentes das nações exportadoras de alimentos, fato que nos levará a observar com maior rigor o avanço da produção irrigada em áreas ambientalmente frágeis ou protegidas, como forma de mostrar a maturidade do produtor e do produto brasileiro, para melhorar as condições de competitividade nos mercados mais exigentes.

Outro grande desafio enfrentado pelo Brasil é o processo da melhora de gestão dos perímetros públicos irrigados, como alternativa para viabilizar as concessões e atrair

investimentos privados, na recuperação da infraestrutura e concluir as obras de implantação, oferecendo ao mercado novas áreas de produção.

Atento a esta realidade, desde 2020, editou-se a Portaria MDR 2.154, de 11/08/2020, para a estruturação de “Polos de Agricultura Irrigada”, o que possibilitou a implementação de 8 polos prioritários, envolvendo 119 municípios; viabilizando o recebimento de investimentos e o avanço no processo de melhoria da qualidade da produção agrícola, com a participação de irrigantes e investidores.

O sucesso de alguns projetos, como o perímetro Nilo Coelho, em Petrolina, nos leva a crer que o planejamento de novas áreas abertas para irrigação, beneficiando o Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. A região abrangida por estes estados, conhecida como MATOPIBA, deverá ser responsável pela expansão da área de produção irrigada no Brasil para 10 milhões de hectares nos próximos anos.

Os desafios são muitos e as barreiras ainda são bastante fortes, mas sabemos que a segurança hídrica, aliada a uma adequada política de disseminação de novas tecnologias e ao ajuste e modernização da legislação ambiental – passando pela desburocratização do setor – permitirá o acesso a sistemas de produção de energias alternativas no campo. Estes fatores, alinhados, contribuirão definitivamente para melhorar a vida do produtor rural brasileiro, levar riquezas para o campo e tornar o Brasil uma potência na produção de alimentos, sem igual no mundo todo.

Daí a importância de iniciativas como esta, dos Editores, disseminando entre os acadêmicos e estudiosos do tema, e entre empresários, políticos e investidores, o potencial da agricultura. Honra-me os Editores com o convite para escrever este posfácio, onde proponho-me a mostrar, de modo singelo, a aplicação prática e o viés político-econômico de questão tão importante para o país e para o futuro da humanidade.

Não é novidade que um dos maiores desafios e incertezas do porvir é a alimentação e uma população mundial de 7 bilhões de habitantes e em crescimento exponencial. Em que pese o momento trágico que se vive hoje no mundo inteiro, com a pandemia do COVID 19, a expectativa é de que, superado este lamentável desafio global, retomemos o ritmo de crescimento de uma população cada vez mais longa, exigente e consciente. Encontrar e aplicar soluções para alimentá-la é uma missão da maior importância, confiada a mentes capazes e engajadas, como nossos homenageados.

Rogério Simonetti Marinho

Ministro do Desenvolvimento Regional

Salassier Bernardo

HOMENAGEM

Irrigação



Salassier Bernardo, Engenheiro-Agrônomo (1967) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), mestre em Irrigação (1969) pela University of California, Davis, USA, Ph.D. em Irrigação (1975) pela Utah State University, Logan, USA e pós-doutor (1987) pelo Institute of Irrigation Studies, da University of Southampton, UK, é ex-professor titular da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foi chefe do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e presidente do Conselho de Pós-Graduação. Orientou e coorientou cerca de 70 dissertações de mestrado e 18 teses de doutorado e assina 150 artigos publicados em revistas científicas e técnicas, em anais de congressos e jornais. É ex-bolsista do CNPq (1A) e autor de dois livros e de três capítulos de outros. É ex-professor titular da Universidade Estadual do Norte Fluminense (Uenf), onde exerceu também o cargo de coordenador do Curso de Pós-Graduação em Produção Vegetal e foi reitor de 1999 a 2003.

Autor do livro Manual de Irrigação com lançamento em 1982 e nona edição em 2019, completando assim 40 anos de um sucesso editorial não comum no nosso país, sendo considerado um talismã por muitos técnicos da área. Em um passado recente, o livro era uma das poucas opções técnicas na área de irrigação e, a relação dos técnicos e estudantes da área com ele superou a relação normal, por isso a palavra "talismã", significando que o livro além de ensinar e servir de consulta, é um troféu que acompanha e reafirma a opção profissional.

O Manual de Irrigação teve edições contínuas desde 1982 sendo um sucesso da literatura técnica de Irrigação, com mais de 35 mil exemplares vendidos desde o lançamento. Na primeira edição, o professor Salassier esclarece que o livro propõe transmitir conhecimentos básicos e científicos relativos à irrigação por intermédio de dois caminhos, descrevendo os diversos métodos de irrigação, proporcionando informações fundamentais para o dimensionamento de projetos de irrigação e discutindo a irrigação, drenagem e agricultura em geral. Completa dizendo que o livro Manual de Irrigação contém anotações substanciais e imprescindíveis, todas elas discutidas em aulas ministradas na UFV. Informa no lançamento da nona edição, a manutenção dessas premissas tão bem definidas, como também a afirmativa de que esta obra só pôde ser concretizada graças ao ambiente de trabalho na UFV.

A publicação do Manual de Irrigação por parte do professor Salassier Bernardo, só foi possível, com sua inteligência privilegiada, exaustiva dedicação, capacidade técnica e muita determinação, nos presenteou com essa "bíblia" da irrigação. O professor Salassier foi sempre um incansável atuante da área de irrigação, ainda hoje continua conectado com o setor através de uma incansável disponibilidade para orientar e definir estratégias relacionadas a carreira técnica dos seus inúmeros colegas e amigos. Também tem dedicado a escrever sobre temas de interesse do setor de irrigação.

Alysson Paolinelli
Durval Dourado Neto
Everardo Chartuni Mantovani
Klaus Reichardt

RELAÇÃO DE AUTORES, CAPÍTULOS E E-MAILS

Id	Autor	Capítulo	E-mail
1	Alberto Giaroli de Oliveira Pereira Barretto	17	barretto.alberto@gmail.com
2	Allan Delfino	17	alldel74@hotmail.com
3	Alexandre Barcellos Dalri	18	alexandre.dalri@unesp.br
4	Alysson Paolinelli	17	alysson.paulinelli@hotmail.com
5	André Luís Teixeira Fernandes	20	andre.fernandes@uniube.br
6	André Santana Andrade	19	capitalagricola@hotmail.com
7	Catariny Cabral Aleman	13/23	catariny@ufv.br
8	Daniel Fonseca de Carvalho	4	daniel.fonseca.carvalho@gmail.com
9	Danielle Morais Amorim	19	nielymorais@gmail.com
10	Dionei Lima Santos	21	dionei.santos@ifpa.edu.br
11	Durval Dourado Neto	17	ddourado@usp.br
12	Edmar José Scaloppi	10	edmar.scaloppi@unesp.br
13	Elias Fernandes de Sousa	16	efs@uenf.br
14	Eugênio Ferreira Coelho	21	eugenio.coelho@embrapa.br
15	Eusímio Felisbino Fraga Júnior	20	eusimiofraga@ufu.br
16	Everardo Chartuni Mantovani	16	everardo@ufv.br
17	Felipe Cardoso de Oliveira Maia	25/26	felipe2cardoso@gmail.com
18	Fernando Campos Mendonça	19	fernando.mendonca@usp.br
19	Fernando França da Cunha	13	fernando.cunha@ufv.br
20	Gustavo Fanelli Hossri	5	gustavo.hossri@hotmail.com
21	Jarbas Honorio de Miranda	6	jhmirand@usp.br
22	João Carlos Cury Saad	8	joao.saad@unesp.br
23	José Antônio Frizzone	15	frizzone@usp.br
24	Jose Giacoia Neto	24	jose.giacoia.neto@rainbird.com
25	Juliano Dalcin Martins	12	juliano.martins@ufsm.br
26	Laura Elizabeth Christianson	6	lechris@illinois.edu
27	Luciano Alves de Oliveira	6	luciano8@illinois.edu
28	Luís César Dias Drumond	19	irriga@gappi.com.br
29	Luís Henrique Bassoi	9	luis.bassoi@embrapa.br
30	Luiz Fabiano Palaretti	18	luiz.f.palaretti@unesp.br
31	Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	4	coutinho@deg.ufla.br
32	Maicon Fábio Appelt	19	maicon@gappi.com.br
33	Marcela Almeida de Araujo	17	marcela.araujo@usp.br
34	Marco Antônio Fonseca Conceição	22	marco.conceicao@embrapa.br

35	Marcus Henrique Tessler	3	marcus.tessler@netafim.com
36	Maurício Antônio Coelho Filho	22	mauricio-antonio.coelho@embrapa.br
37	Mirta Teresinha Petry	12	mirta.petry@ufsm.br
38	Patricia Angélica Alves Marques	23	paamarques@usp.br
39	Paulo Cesar Sentelhas	11	pcsentel.esalq@usp.br
40	Pedro Abel Vieira Júnior	17	pedroabelvieira@gmail.com
41	Pedro Alves Quilici Coutinho	17	paq.coutinho@gmail.com
42	Regina Célia de Matos Pires	22	regina.pires@sp.gov.br
43	Reimar Carlesso	12	reimar.carlesso@gmail.com
44	Renato Silva	2	renato.silva@valmont.com
45	Roberto Filgueiras	13	roberto.f.filgueiras@ufv.br
46	Roberto Rodrigues	17	gvagro@fgv.br
47	Rodnei Rizzo	17	rodnei.rizzo@gmail.com
48	Rodrigo Moura Pereira	25/26	rodrigomouracbs@gmail.com
49	Rodrigo Ribeiro Franco Vieira	14	rodrigo.franco@codevasf.gov.br
50	Rubens Alves de Oliveira	13	rubens@ufv.br
51	Rubens Duarte Coelho	1	rdcoelho@usp.br
52	Salassier Bernardo	16	salassierb@gmail.com
53	Sergio Nascimento Duarte	7	snduarte@usp.br
54	Verônica Gaspar Martins Leite de Melo	15	vegaspar.vg@gmail.com
55	Vinicius Bof Bufon	25/26	vinicius.bufon@embrapa.br
56	Welson Lima Simões	21	welson.simoies@embrapa.br



Alysson Paolinelli

Engenheiro Agrônomo (ESAL, 1959). Diretor da ESAL (1967-1971). Secretário de Agricultura do Estado de Minas Gerais (1971-1974). Ministro da Agricultura (1974-1979). Presidente do Banco do Estado de Minas Gerais (1979-1982). Presidente da Associação Brasileira de Bancos Comerciais Estaduais (Asbace) (1980-1982). Presidente da Fiat Allis Latino Americana (1982-1996 e 1998-2001). Deputado Federal (1987-1991). Presidente da Confederação Nacional de Agricultura do Brasil (CNA, 1988-1990). Presidente do Fórum Nacional de Agricultura (1992-1993). Presidente da Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho, 2010-2015). Prêmio World Food Prize (2006). Indicado ao Prêmio Nobel da Paz (2021). Terceiro Titular da Cátedra Luiz de Queiroz (Esalq/USP, 2020-2022).



Durval Dourado Neto

Engenheiro Agrônomo (UFV, 1984). Especialização (Física do Solo, ICTP/Itália, 1989). Mestre (Irrigação e Drenagem, Esalq/USP, 1989). Doutor (Solos e Nutrição de Planta, Esalq/USP, 1992). Pós-Doutor (University of California/EUA, 1993-1995). Pesquisador CNPq (Nível 1A). Coordenador do Grupo de Políticas Públicas e do Laboratório de Modelagem Agrícola, Pecuária e Ambiental - Pixel. Professor Titular do Departamento de Produção Vegetal. Diretor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.



Everardo Chartuni Mantovani

Engenheiro Agrícola (UFV, 1981). Mestre (Engenharia Agrícola, UFV, 1986). Doutor (Agronomia – Manejo da Irrigação, Universidad de Córdoba, 1993). Criou e coordenou por 20 anos o Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada – Gesai (DEA/UFV). Professor (desde 1983) Titular Sênior do Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. É o atual Presidente da ABID (Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem).

DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Técnica e Cultura

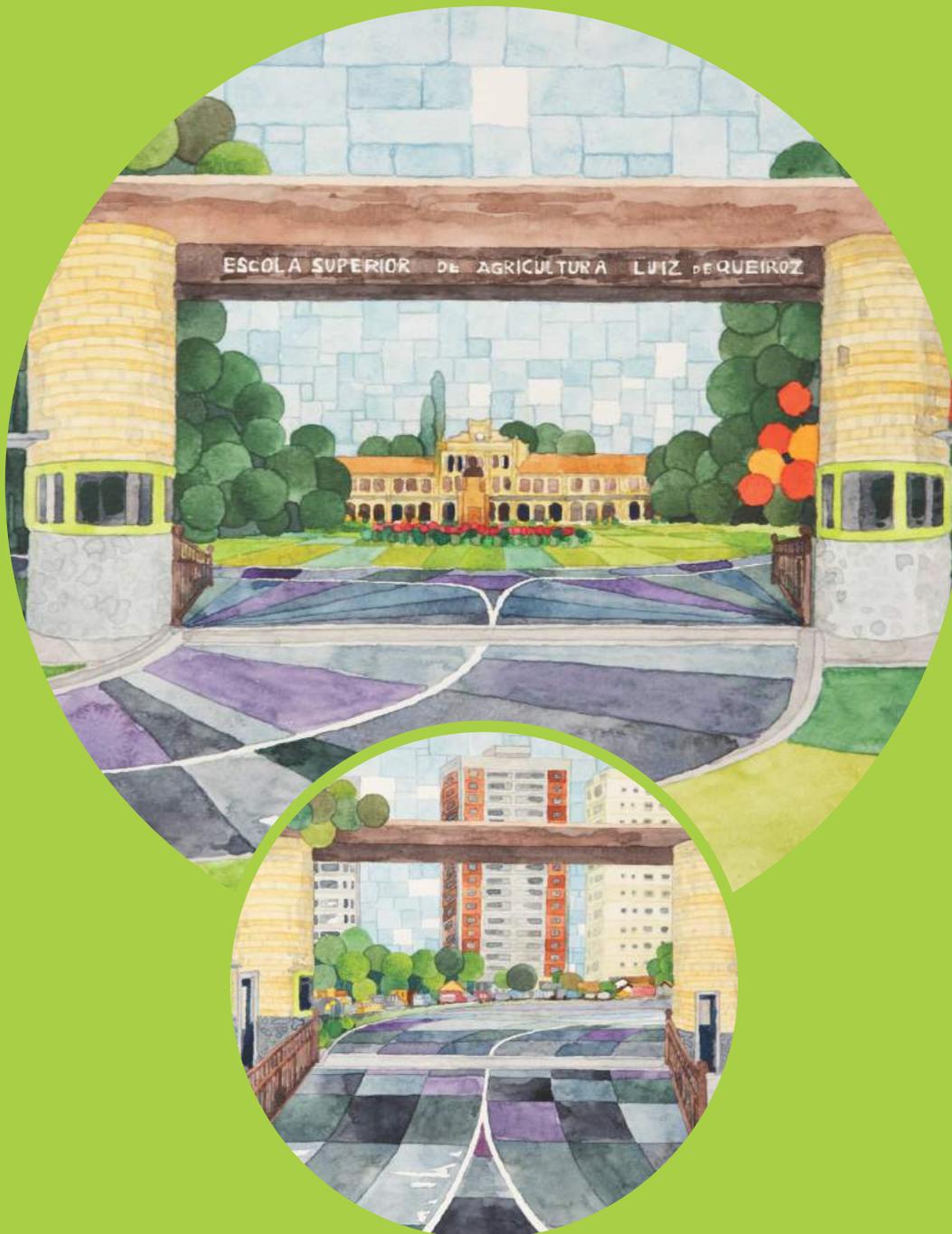


Em 2050 a população mundial será de 9,8 bilhões de pessoas aumentando a demanda global por produtos agropecuários, onde, o Brasil, segundo a FAO, é colocado como peça chave na oferta de alimentos. Neste cenário, a Agricultura Irrigada apresenta importante papel para a agricultura no país, seja para aumentar a oferta de produtos, seja para melhorar os níveis de produção, produtividade, renda e emprego. Além disso, a irrigação tem potencial para contribuir para a preservação dos biomas, ao reduzir a pressão pela expansão da fronteira agrícola pela via do aumento da produtividade das áreas em produção. No entanto, o Brasil, com grande potencial para adoção da agricultura irrigada, demanda por conhecimento e ações planejadas com capacidade de induzir o desenvolvimento sustentável. Este livro traz diferentes abordagens da Agricultura Irrigada no Brasil nos aspectos da área técnica de irrigação e contempla diversas culturas agrícolas, escrito por destacados profissionais de diversos setores dessa área, constituindo uma importante contribuição para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada brasileira e mundial.



DIFERENTES ABORDAGENS SOBRE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Técnica e Cultura



Portal Monumental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Universidade de São Paulo



ESALQ

USP