

DESEMPENHO E OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

José Antônio Frizzone – ESALQ/USP. 2017.

frizzone@usp.br

Departamento de Engenharia de Biosistemas

Notas de Aula da disciplina LEB 1571 - Irrigação.

Curso de Graduação em Engenharia Agrônômica – ESALQ/USP

Piracicaba – SP

INTRODUÇÃO

Burton (1999) considera que a melhoria da eficiência da irrigação deve atender a uma análise holística das fases pelas quais se passa o processo. A aproximação holística, tão necessária para entender a agricultura irrigada, é incorporada através da consideração de todos os fatores que podem influenciar na forma como a água é usada, sejam eles técnicos, econômicos, políticos, sociais ou ambientais. A análise pode ser posteriormente refinada pela ponderação do impacto de cada fator que influencia no uso da água em uma dada situação.

Para entender o que acontece em um sistema de irrigação é necessário realizar análise de diagnóstico para identificar as causas e os efeitos. A maior dificuldade com agricultura irrigada é a complexidade e a natureza das especificidades locais para muitos problemas e seu potencial de soluções. Problemas e soluções são melhores considerados como diagrama de árvore onde um dado problema pode ter, ao mesmo tempo, causa e efeito (isto é, um problema A é causado por um problema B, e causa um problema C. O problema C, por outro lado, causa um problema D). Assim, uma distribuição de água ineficiente pode ser causada por um calendário de irrigação inadequado e tem o efeito de proporcionar desuniformidade da produtividade das culturas. O problema de um calendário de irrigação inadequado pode ser causado por falta de treinamento dos irrigantes, pequeno nível de motivação, inadequada coleção de dados, etc. A identificação dos fatores envolvidos forma a base para um sistema hábil para análise de diagnóstico.

Ao identificar soluções potenciais é importante investigar a exequibilidade daquelas soluções. Melhorar o manejo da irrigação e a operação dos sistemas através de treinamento somente é possível se as pessoas envolvidas aplicarem o treinamento. Eles devem, portanto, ser motivados e ter as facilidades necessárias.

A maior restrição para nosso entendimento sobre o uso da água é a dificuldade associada com sua medida e quantificação. Medições e registros de dados de vazão, pressão do sistema, variáveis de clima são raros e providos erros potenciais. A determinação correta quantidade de água requerida pela cultura em períodos específicos do seu desenvolvimento é difícil, se não impossível, para a maioria dos irrigantes. Sem a previsão da lâmina de irrigação definida como objetivo, é improvável que os agricultores apliquem a quantidade de água necessária. 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 para a maioria dos irrigantes seja relativamente baixa – como poderia ser diferente?

Questões que poderiam ser dirigidas a esse respeito são: como o irrigante poderia decidir quando e quanto irrigar? Como ele sabe quando aplicou suficiente quantidade de água? É eficiente a forma como o irrigante opera o sistema de irrigação em função da sua experiência? Seu nível educacional, seu conhecimento, o aconselhamento que ele procura são adequados?

Na formulação das metas para uso de água é conveniente re-analisar e considerar não quanto a água é produtiva, mas sim qual a produtividade potencial está sendo perdida pelo manejo pobre ou inadequado e o uso do recurso. Um exemplo clássico é a escassa atenção dada à perda produtiva potencial por falhas provenientes da falta de manutenção dos sistemas de irrigação. As

perdas potenciais, ao longo dos anos, podem somar uma quantidade muitas vezes maior do que a quantidade de recursos financeiros necessários para a adequada manutenção do sistema. As perdas de produtividade potencial nos projetos de irrigação, decorrentes da manutenção inadequada, são pouco discutidas na literatura.

Estudos recentes de uso da água em sistemas de irrigação e drenagem têm questionado a validade da preocupação com as baixas eficiências de condução e aplicação quando a água resultante da drenagem é re-usada à jusante do sistema. Então, a questão que surge é a seguinte: é mais conveniente focar o re-uso da água de drenagem em vez de focar a melhoria do manejo da água derivada à parcela e do sistema de irrigação?

Para melhorar o manejo da irrigação é necessário estabelecer procedimentos para a avaliação do desempenho dos sistemas. A teoria do manejo requer que os objetivos sejam identificados e definidos; as metas sejam fixadas, e as medidas e os indicadores de desempenho sejam usados para monitorar a consecução das metas e, por conseguinte, os objetivos. A inadequação dos procedimentos para avaliação do desempenho foi identificada por pesquisadores nos meados dos anos 80, quando eles estudaram como os sistemas de irrigação estavam sendo manejados. Desde então muitos trabalhos de avaliação de desempenho foram conduzidos. Ainda serão necessárias pesquisas para identificar medidas práticas para atender às demandas da avaliação de desempenho de diferentes tipos de sistemas de irrigação e de drenagem. A disseminação destas informações em um formato utilizável pelos técnicos da extensão rural e pelos irrigantes é crucial para proporcionar melhoria no manejo e uso da água.

A caracterização dos tipos de sistemas de irrigação está associada com as questões do desempenho. Se as soluções para o baixo desempenho estão sendo aplicadas a outros sistemas além daqueles para os quais as pesquisas foram conduzidas, é necessário um procedimento para descrever e categorizar os sistemas de forma que as soluções potenciais podem ser transferidas.

Uma das mais surpreendentes características do manejo dos sistemas de irrigação públicos é a aceitação tácita que pouco ou nada pode ser feito em muitos projetos de gestão governamental para relacionar salários e remuneração com desempenho dos projetos de irrigação. A crença de que os funcionários públicos não podem ser recompensados pelas suas ações e o desempenho de um projeto de irrigação é inerente, é que faz Banco Mundial e outras agências de financiamento forçarem os governos a mudar ou privatizar os projetos de irrigação. Existe espaço para idéias inovadoras para sugerir formas para remunerar os técnicos de agências públicas visando um bom desempenho dos projetos, em vez de fechar os olhos e seguir corrupto e continuar com práticas injustas. Sob esse foco muitas oportunidades valiosas identificadas pela pesquisa podem falhar ao serem implementadas.

O grau de desenvolvimento que segue a agricultura irrigada em alguns países é uma valiosa oportunidade para acumular experiência. O desenvolvimento que tem acontecido em certos países, as razões e as aptidões ambientais para tal desenvolvimento, fornecem indicações para o desenvolvimento em outros países. Existe uma progressão natural dentro da sociedade para adaptar e refinar sua tecnologia de irrigação com base na sua própria história e no ambiente político/técnico/econômico. Têm ocorrido aprimoramentos no sentido de melhorar a eficiência de uso da água e conservação da energia (sistematização do terreno a laser para irrigação por superfície; irrigação por superfície com vazão intermitente; sistema de re-uso da água escoada no final da parcela; substituição de sistemas de irrigação menos eficientes por mais eficientes). Estes aprimoramentos têm seguido aproximações passo-a-passo e, enquanto as restrições têm sido atenuadas, novos desafios têm sido encontrados. É valioso observar se existem caminhos e modelos no processo de desenvolvimento em diferentes países.

A avaliação do desempenho dos sistemas de irrigação necessita ser focada em três áreas: primeiramente, o entendimento sobre o que está acontecendo. Segundo, como as avaliações podem melhorar as práticas de manejo da irrigação e, terceiro, onde existe a necessidade de adoção de tecnologias, de práticas e de procedimentos para maior eficiência do uso de água. Dada a limitação na disponibilidade de recursos financeiros para os trabalhos de avaliação, atenção também precisa ser dada a quanto dos resultados serão úteis e aplicados e a extensão dos impactos obtidos. Serão necessárias avaliações sobre a probabilidade das técnicas de manejo serem adotadas e do potencial para contribuir positivamente com a redução do desperdício de água, com o aumento da produtividade e com o aumento da renda do irrigante.

Este texto procura descrever técnicas para avaliação do desempenho da irrigação e identificar estratégias para a melhoria da uniformidade e da eficiência da irrigação, visando o manejo eficiente da irrigação. Também é dado um enfoque geral sobre a otimização da irrigação, visando à maximização do lucro da atividade agrícola, à economia de água e à redução dos impactos ambientais decorrentes da irrigação. Trata-se da maximização do lucro na propriedade agrícola, o que representa um problema de otimização. Serão discutidas as características essenciais da otimização da irrigação focando algumas análises simples, que geralmente desconsideram muitas das complexidades da agricultura real, mas que poderão ilustrar a natureza essencial da otimização da irrigação.

DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO

BALANÇO HÍDRICO EM CAMPOS IRRIGADOS

A partição física da água aplicada em um campo cultivado é representada pelo balanço hídrico (Figura 1), contabilizando as entradas e saídas de água num dado volume de solo, durante um intervalo de tempo. O volume de solo considerado depende da cultura em estudo, pois ele deve englobar seu sistema radicular. Assim é que se considera como limite superior a superfície do solo e como limite inferior a profundidade do sistema radicular da cultura. Os principais componentes do balanço hídrico em um campo irrigado são (Eq. 1):

$$\Delta A = PE + IR - T - E \pm R \pm D \quad (1)$$

O termo ΔA representa a variação do armazenamento de água no solo no período considerado. Os componentes PE e IR representam a entrada de água no sistema por precipitação efetiva e irrigação. Os componentes T (transpiração) e E (evaporação do solo e da superfície das plantas), para muitos estudos práticos, não são separados, sendo a combinação deles denominada evapotranspiração (ET). A drenagem (D) representa os fluxos verticais de água no limite inferior do volume de controle. Quando o fluxo é descendente D representa uma saída de água do sistema por drenagem profunda (DP), podendo ser natural ou forçada com sistema de drenagem subsuperficial. Mas, dependendo das condições, ao invés de sair, a água poderia entrar através desse limite, isto é, ter-se-ia um fluxo ascendente através do limite inferior. Neste caso haveria uma entrada de água no sistema por ascensão capilar (AC). A entrada de água no volume de solo por ascensão capilar, na maioria das vezes, representa uma pequena contribuição em campos irrigados, além de apresentar dificuldades de medição na prática. Da mesma forma, o escoamento superficial (R) também pode se constituir em saída de água do volume de controle (RS) ou em uma entrada (RE). A drenagem profunda e o escoamento superficial freqüentemente contribuem com o suprimento de água para as áreas à jusante, dentro da unidade hidrológica, ou retornam para a fonte original (superficial ou subterrânea). A quantidade de água que é incorporada nos tecidos das plantas ou no produto colhido é, geralmente, muito pequena em relação aos demais componentes do balanço hídrico e, por isso, é desconsiderada. Sob essas considerações, o balanço hídrico em um campo irrigado pode ser escrito da seguinte forma simplificada (Eq. 2):

$$\begin{aligned} \Delta A &= (PE + IR + AC + RE) - (ET + DP + RS) \\ WT &= PE + IR + AC + RE \\ \Delta A &= WT - ET - DP - RS \\ WT &= ET + DP + RS + \Delta A \end{aligned} \quad (2)$$

sendo, WT a quantidade total de água que entra em um campo irrigado para satisfazer o balanço de água. A variação do armazenamento de água no solo, na profundidade das raízes (ΔA), com

base anual, é frequentemente muito pequena, de forma que, para propósitos de avaliação do desempenho de sistemas de irrigação pode ser desconsiderado.

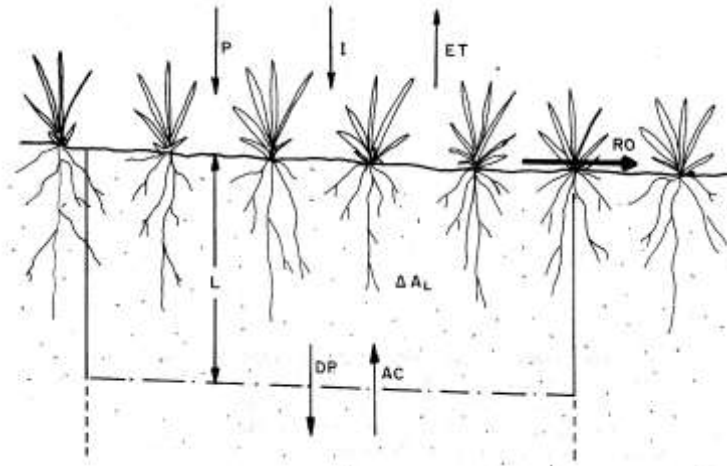


Figura 1 – Esquema do balanço hídrico em um campo irrigado

PARTIÇÃO DA ÁGUA APLICADA POR IRRIGAÇÃO

A partição da água aplicada por irrigação quanto à possibilidade de recuperação para uso é feito da seguinte forma:

(a) **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. Assim, 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 irrecuperável e se denomina uso consuntivo. Alguns usos consuntivos são:

- Evapotranspiração das culturas
- Evapotranspiração das ervas daninhas
- Evaporação da água aspergida pelos aspersores
- Evaporação de reservatórios
- Evaporação do solo úmido
- Água exportada com o produto, etc

(b) **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 esco superficialmente e a que infiltra nos canais. Alguns 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.

A partição da água de irrigação quanto aos benefícios agronômicos é feita como segue:

(a) **Usos benéficos** – Uso benéfico de água, por definição, 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,

água utilizada para lixiviação do excesso de sais do solo, controle climático, preparação do leito de sementeira, para germinação das sementes, umedecimento do solo com o objetivo de quebrar a crosta superficial e facilitar a emergência das plântulas.

(b) **Usos não benéficos** – Uso não benéfico refere-se à fração da água aplicada que não tem objetivo agrônomo. São exemplos: excesso de percolação profunda em relação à necessária para remoção de sais; excesso de escoamento superficial, evapotranspiração de ervas daninhas, evaporação desnecessária da água na superfície de solo úmido de áreas vizinhas à área cultivada, 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.

Todos os usos benéficos da água são considerados razoáveis, entretanto, 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, 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. Os usos não benéficos não razoáveis são aqueles que não possuem justificativas técnica, econômica, social e ambiental. A seguir se resumem os tipos de uso de água de irrigação:

■ Usos benéficos de água

- Evapotranspiração das culturas
- Evapotranspiração de plantas benéficas (quebra-ventos, cobertura e proteção do solo, habitat para insetos benéficos)
- Água contida no produto colhido e nos tecidos vegetais
- Água utilizada para remoção de sais do solo
- Água utilizada para controle do clima
- Água utilizada para preparação do solo e plantio
- Água utilizada para quebrar a crosta superficial do solo e facilitar a emergência
- Água utilizada para aplicação de pesticidas e fertilizantes, etc.

■ Usos não benéficos de água

Usos Razoáveis

- Evaporação de reservatórios e canais
- Alguma evaporação de solo úmido
- Alguma evaporação da água aplicada por aspersão
- Alguma água utilizada em lavagem de filtros
- Água para satisfazer algum propósito ambiental
- Água necessária para manter o padrão de qualidade de drenos
- Alguma percolação por incertezas no manejo da irrigação
- Alguma percolação pela não uniformidade de aplicação do sistema de irrigação
- Perdas que podem ser antieconômicas de serem evitadas, etc.

Usos não razoáveis

- 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.

NECESSIDADE DE ÁGUA DE ECOSISTEMAS CULTIVADOS

Em condições naturais, no campo, considerando as plantas e o solo ocupado pelas raízes, um ecossistema cultivado apresenta a seguinte necessidade de água:

$$WTN = WET + WLS + \Delta A + \dots \quad (3)$$

sendo:

WTN – necessidade total de água do cultivo;

WET – necessidade de água para a evapotranspiração (uso benéfico);

WLS – quantidade mínima de água que deve passar através zona radicular para manter um balanço de sais favorável no perfil do solo (uso benéfico).

+... – água de irrigação para outros usos benéficos e não benéficos razoáveis

NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO DAS CULTURAS

No campo, a irrigação total necessária (ITN) deve satisfazer a diferença entre a necessidade total de água (WTN) e a precipitação efetiva (PE):

$$ITN = WTN - PE \quad (4)$$

$$ITN + PE = WET + WLS + \Delta A + \dots$$

$$ITN = WET + WLS - PE + \Delta A + \dots \quad (5)$$

MEDIDAS DE DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO

A qualidade da irrigação é expressa por alguns parâmetros de desempenho nomeados, basicamente, por três palavras-chave: uniformidade, eficiência e grau de adequação. O termo uniformidade refere-se aos parâmetros de desempenho associados à variabilidade da lâmina de irrigação aplicada. É uma grandeza que caracteriza todo o sistema de irrigação e intervém no seu projeto, tanto agrônômico, pois afeta o cálculo da quantidade de água necessária à irrigação, quanto no hidráulico, pois, em função dela, define-se o espaçamento entre emissores de água, a vazão do sistema e o tempo de irrigação. Em inglês, o termo correspondente é “uniformity”.

O termo eficiência é utilizado para identificar parâmetros que, através de uma razão entre quantidades de água envolvidas no processo de irrigação, expressam um balanço entre os seguintes volumes de água: (a) derivado da fonte de suprimento; (b) aplicado à parcela; (c) necessário à planta; (d) armazenado no solo à profundidade efetiva das raízes, (e) evaporado e derivado pelo vento, (f) percolado e escoado superficialmente para fora dos limites da área cultivada. Este termo corresponde à tradução literal do vocábulo em inglês “efficiency”.

O grau de adequação foi proposto para expressar o quanto o sistema de irrigação satisfaz, em termos de fração de área que está recebendo água, a condição de achar-se em conformidade com as necessidades da lavoura, para manter a qualidade do produto e a produtividade vegetal em um nível econômico. “Adequacy” é o termo em inglês, proposto para expressar o grau de adequação de um sistema de irrigação às suas específicas condições de utilização, de maneira a satisfazer de forma conveniente o seu usuário.

Eficiência

- Eficiência de irrigação – EI%

Jensen (2007) cita a definição de eficiência dada pelo Webster's Unabridged Dictionary (New World Dictionary, 1979): **eficiência** é (1) a habilidade para produzir o efeito desejado com o mínimo esforço, custo, ou desperdício; e (2) a razão entre o trabalho efetivo realizado e a energia despendida para a produção, como uma máquina; saída dividida por entrada. **Eficiente** foi definido como produzir o efeito desejado, ou resultado, com o mínimo esforço, custo ou desperdício.

Quando aplicado à irrigação, o tradicional termo **eficiência da irrigação** (razão entre água consumida pelo processo de ET do cultivo e água derivada de um rio ou outra fonte natural de água), conforme definido por Israelsen (1950), é parcialmente aplicável ao considerar a água consumida (ET da cultura) 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. Se o custo é o principal critério considerado, então um sistema de irrigação por superfície, manejado adequadamente, pode ser mais eficiente que um sofisticado sistema de aspersão ou microirrigação. Jensen (2007) salienta que o desempenho de um sistema de irrigação pode ser melhor caracterizado, em relação ao uso dos parâmetros de eficiência, ao se descrever a produtividade física ou econômica do sistema. Também propõe que a eficiência de irrigação, conforme definida por Israelsen (1950), seja denominada de **Coefficiente de Uso Consuntivo**.

Um sistema ou projeto de irrigação pode servir a outras necessidades agrícolas além de satisfazer a demanda por ET das culturas (Heermann et al., 1992). A eficiência de irrigação como definida pela ASCE On-Farm Irrigation Committee (ASCE, 1978) e por Burt et al. (1997) representa a razão entre a lâmina (ou volume) de irrigação que é benéficamente usada e a lâmina (ou volume) que foi aplicada ao campo (Eq. 6):

$$EI = 100 \frac{WIB}{WIA - \Delta A} \quad (6)$$

sendo:

WIB – lâmina de irrigação benéficamente usada (WET + WLS + – PE + ...);

WIA – lâmina média de irrigação aplicada ao campo (uso benéfico + não benéfico);

ΔA – variação de armazenamento de água no solo.

As definições são usualmente expressas em altura de água equivalente (volume por unidade de área) exceto para sistemas de irrigação por gotejamento, microaspersão e aspersão com cobertura parcial, para os quais o volume de água pode ser uma medida mais apropriada. O numerador da Eq. (6) representa os usos benéficos para múltiplos propósitos, incluindo água para ET da cultura, lixiviação de sais, proteção contra geadas, redução de temperatura ambiente, aplicação de fertilizantes e pesticidas, preparação do solo, quebra de 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 ervas daninhas tenderá a reduzir a eficiência de irrigação. Estes usos são não benéficos.

O denominador da Eq. (6) corresponde à lâmina total de irrigação que foi derivada ao campo (usos benéficos + não benéficos = lâmina de irrigação aplicada - ΔA). Esta quantidade de água entra no campo em um intervalo específico de tempo (ex., intervalo entre duas irrigações consecutivas, ou em uma estação de cultivo). Se, ao final do período, a quantidade de água contida no terreno é a mesma do início, então a variação de armazenamento da água de irrigação é zero, e toda água aplicada deixou o campo por ET, escoamento, percolação profunda, etc. Dessa forma, a água armazenada temporariamente na zona radicular para uso fora do intervalo de tempo específico não é contabilizada – nem adicionada ao uso benéfico nem subtraída dele.

O termo “água de irrigação” exclui a água aplicada naturalmente à cultura por precipitação natural ou ascensão do lençol freático. Também, é possível, sem perda de generalidade, utilizar volume de água de irrigação no numerador e no denominador da Eq. (6), entendendo que volume é simplesmente o produto entre lâmina e área (da parcela, do campo ou do projeto). A relação entre EI, usos benéficos e não benéficos de água de irrigação pode ser feita pelas Eqs. (7 e 8):

$$\text{Usos benéficos} + \text{Usos não benéficos} = 100\% \quad (7)$$

$$\text{Usos não benéficos} = (100 - EI)\% \quad (8)$$

• Índice de Sagacidade da Irrigação – IS%

Embora a EI seja um termo útil para comparar usos benéficos e não benéficos da água de irrigação, do ponto de vista social e dos produtores ele pode ser incompleto. 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. Ou, sob outro ponto de vista, pode ser prudente para um irrigante aplicar alguma quantidade adicional de água que não é diretamente usada pelas culturas, isto é, que constitui perda inevitável. Solomon e Burt (1999) propuseram um índice de desempenho da irrigação que contempla usos de água benéficos e não benéficos razoáveis, denominado **sagacidade da irrigação**. O termo sagacidade foi empregado no sentido de prudência. O IS é definido pela Eq. (9):

$$IS = 100 \frac{WIB + WINBR}{WIA - \Delta A} \quad (9)$$

sendo, WIB a lâmina de irrigação usada beneficemente e WINBR a lâmina de irrigação para usos não benéficos razoáveis. Não se sugere que SI substitua EI. Com objetivos bem definidos, ambos podem oferecer informações úteis.

A eficiência de irrigação, como conceito, tem sido freqüentemente mal aplicada ou mal interpretada por falhas na diferenciação entre uso consuntivo e uso benéfico. É absolutamente falso entender que $(100 - IE)\%$ da água aplicada por irrigação representa a quantidade que é desperdiçada e, portanto, o potencial para conservação ou realocação. Uma $IE = 75\%$ não significa que 25% da água de irrigação aplicada poderia ser conservada e redirecionada para qualquer outra parte ou fim. Como se enfatizou, algum grau de uso não benéfico é geralmente razoável, de forma que o potencial para conservação e realocação consiste somente dos usos não benéficos e 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 seu revestimento para evitá-la constitui um uso razoável, embora não benéfico. Nenhum sistema de irrigação pode ser projetado para aplicar água com perfeita uniformidade e, portanto, alguma percolação profunda devida a não uniformidade 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.

• Eficiência de Aplicação – EA%

A aplicação de água por irrigação em campos individuais é realizada por diferentes sistemas de irrigação. O intento é armazenar no perfil do solo uma quantidade suficiente de água para suprir a demanda das culturas e outros usos benéficos como, por exemplo, uma fração para lixiviação dos sais. A definição de **eficiência de aplicação** de água de irrigação, de acordo com Burt et al. (1997), é dada pela Eq. (10):

$$EA = 100 \frac{WIS}{WIA} \quad (10)$$

sendo WIS a lâmina média de irrigação armazenada no perfil do solo e disponível que contribuiu com o objetivo de satisfazer a necessidade de água da cultura (WISMD – lâmina para satisfazer o déficit de água no solo) e para lixiviar o excesso de sais do perfil do solo (WLS). Essa quantidade objetivo pode ser um pouco menor para possibilitar a contabilização da precipitação efetiva.

A eficiência de aplicação descreve quão bem o sistema de irrigação satisfaz a necessidade de irrigação, cuja base é o conceito de atingir uma quantidade meta de irrigação. É usada para

estimar o que acontece durante um simples evento de irrigação, embora a água ainda não tenha sido usada pela cultura. A escolha da quantidade meta de irrigação pode ser o déficit de água no solo (SMD), a ET ou outra quantidade que prevê a manutenção de uma fração de lixiviação ou algum outro uso benéfico.

Na Figura 2 apresenta-se o perfil de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão. A lâmina média aplicada na área (WIA) é 27 mm. e lâmina média infiltrada (WINF) é 23,4 mm para satisfazer um objetivo WIO = 20 mm (WISMD = 15 mm e WLS = 5 mm). Verifica-se que, aproximadamente, 87% da área infiltraram lâminas superiores ao objetivo (área de excesso) e em 13% inferior (área de déficit). Uma aproximação para a lâmina média infiltrada e armazenada no perfil do solo e disponível para suprir o objetivo é: $0,87 \times 20 + 0,13 [(20+15)/2] = 19,7$ mm. Nestas condições, $EA = 100 (19,7/27) = 73\%$. Isto significa que 27% da lâmina aplicada não atingiram o objetivo, isto é, destinou-se à percolação profunda, evaporação e deriva durante a aplicação.

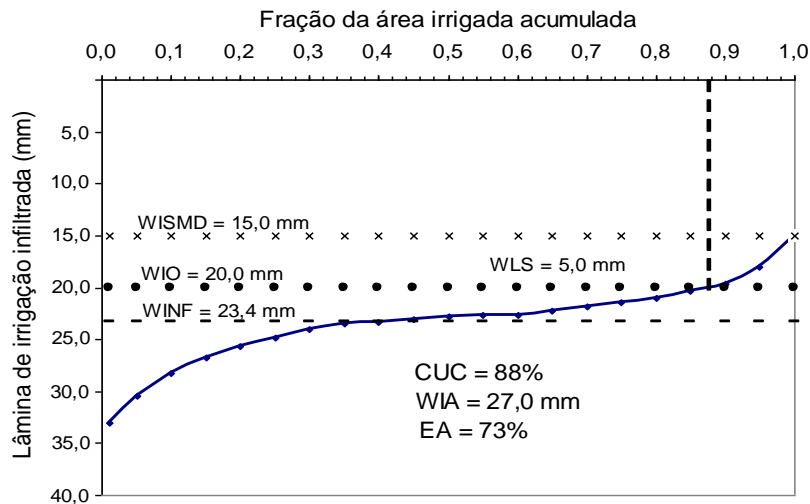


Figura 2 – Perfil de distribuição da água infiltrada em um sistema de irrigação por aspersão

A EA pode ser igual a 1 quando todo o perfil do solo está em déficit após o evento de irrigação. Neste caso toda a água infiltrada está disponível apenas para uso pela cultura (ET). Dessa forma, quando o perfil do solo não está completamente cheio com água ou a aplicação por irrigação não é completamente uniforme, a cultura pode exibir estresse de água em alguma fração da área cultivada que recebe déficit de água e estresse por falta de oxigênio na fração da área que recebe excesso de água. O excesso de água aplicada em relação à necessidade de irrigação pode contribuir com o escoamento superficial e com a percolação profunda. Uma porção da água aplicada é necessária para lixiviar o excesso de sais que pode acumular na zona radicular. A deriva de água pelo vento para fora da área cultivada, o escoamento superficial e a evaporação da água aspergida pelos aspersores tendem a reduzir a eficiência de aplicação. Estes volumes de água representam usos não benéficos e são difíceis de serem quantificados.

Na definição original apresentada pela ASCE On-Farm Irrigation Committee (ASCE, 1978) e reproduzida por Wang et al. (1996) e Pereira (1999), a EA considera apenas a satisfação do déficit de água no solo como objetivo da irrigação (SMD) e não inclui água para lixiviação de sais ou outros usos benéficos (Eq. 11):

$$EA_{(SMD)} = \frac{WISMD}{WIA} \quad (11)$$

em que WISMD é a lâmina média de irrigação armazenada na zona radicular para satisfazer o déficit de água do solo.

• Eficiência de Distribuição – ED%

A distribuição de água pelos sistemas de irrigação não é completamente uniforme e, por isso, ao se irrigar uma área infiltram-se lâminas de irrigação maiores que a lâmina média objetivo (WIO) em uma fração da área e lâminas menores em outra fração da área (Figura 2). Se as lâminas infiltradas na área forem sempre menores que WIO diz-se que irrigação é insuficiente e ocorre déficit de água em toda a área (Figura 3a), não se verificando percolação profunda. Se as lâminas infiltradas superarem WIO em toda a área, a irrigação será excessiva e ocorrerá percolação profunda em área total (Figura 3b). Diz-se que a irrigação é balanceada quando as lâminas infiltradas são maiores que WIO em uma fração da área e menores em outra (Figura 3c). Para descrever a relação entre a lâmina média de irrigação infiltrada que contribui com o objetivo (WIS) e a lâmina média de irrigação infiltrada durante o evento irrigação (WINF), Hart et al. (1979) propôs o índice de desempenho “Eficiência de Percolação Profunda”, o qual, neste texto, será denominado **eficiência de distribuição** (Eq. (12):

$$ED = 100 \frac{WIS}{WINF} \quad (12)$$

A ED pode ser igual a 1 se a irrigação for deficitária em toda a área; caso a irrigação seja excessiva ela é muito baixa. Valores de ED são sugeridos por Hart et al (1979): excelente: $\geq 0,8$; satisfatório: $\geq 0,5$ e $< 0,8$; insatisfatório: $< 0,5$. Como se verifica, a eficiência de distribuição reflete o impacto da irrigação excessiva; o seu complemento representa a percolação profunda. A eficiência de distribuição depende da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação e dos critérios de manejo da irrigação. No exemplo da Figura 2 tem-se que a lâmina objetivo (WIO) é 20 mm, porém a lâmina útil infiltrada que contribuiu para atingir esse objetivo (WIS) é 19,7 mm e, para isso, foi infiltrada uma lâmina média (WINF) de 23,4 mm. Portanto, $ED = 100 (19,7/23,4) = 84,2\%$. Isto significa que a percolação foi 15,8% da água infiltrada, incluindo usos benéficos e outra parte de usos não benéficos. Verifica-se também que, devido à desuniformidade na distribuição de água, apenas 87% da área receberam pelo menos 5 mm de lâmina de lixiviação. Nos outros 13% da área o déficit de umidade no solo (SMD) foi atendido, porém, não foi atendida a fração mínima de lixiviação, podendo, esta área, estar sujeita ao excesso de sais.

• Eficiência de Armazenagem – ES%

A eficiência de aplicação é alta quando a lâmina média de irrigação infiltrada no terreno não é excessiva e o perfil do solo que contém as raízes não é completamente abastecido e, como consequência tem-se pequena percolação, considerando que se previne o escoamento superficial. Entretanto, a lâmina média infiltrada no solo e armazenada na zona radicular pode não ser suficiente para satisfazer toda a necessidade de água das plantas (WISMD) o que poderá resultar em redução da produtividade. Uma alta EI pode, portanto, ser o resultado de uma irrigação deficiente. A **eficiência de armazenagem** é o parâmetro apropriado para considerar a adequação da irrigação quanto à satisfação da necessidade hídrica das plantas. É importante observar neste caso que a lâmina objetivo é WISMD. Hart et al. (1979) e Wang et al. (1996) definem ES como a razão entre a lâmina média de irrigação armazenada no perfil do solo e disponível que contribui com o objetivo de satisfazer a necessidade de água da cultura (WIS) e a lâmina de irrigação real necessária (WISMD) para satisfazer o déficit, Eq. (13):

$$ES = 100 \frac{WIS}{WISMD} \quad (14)$$

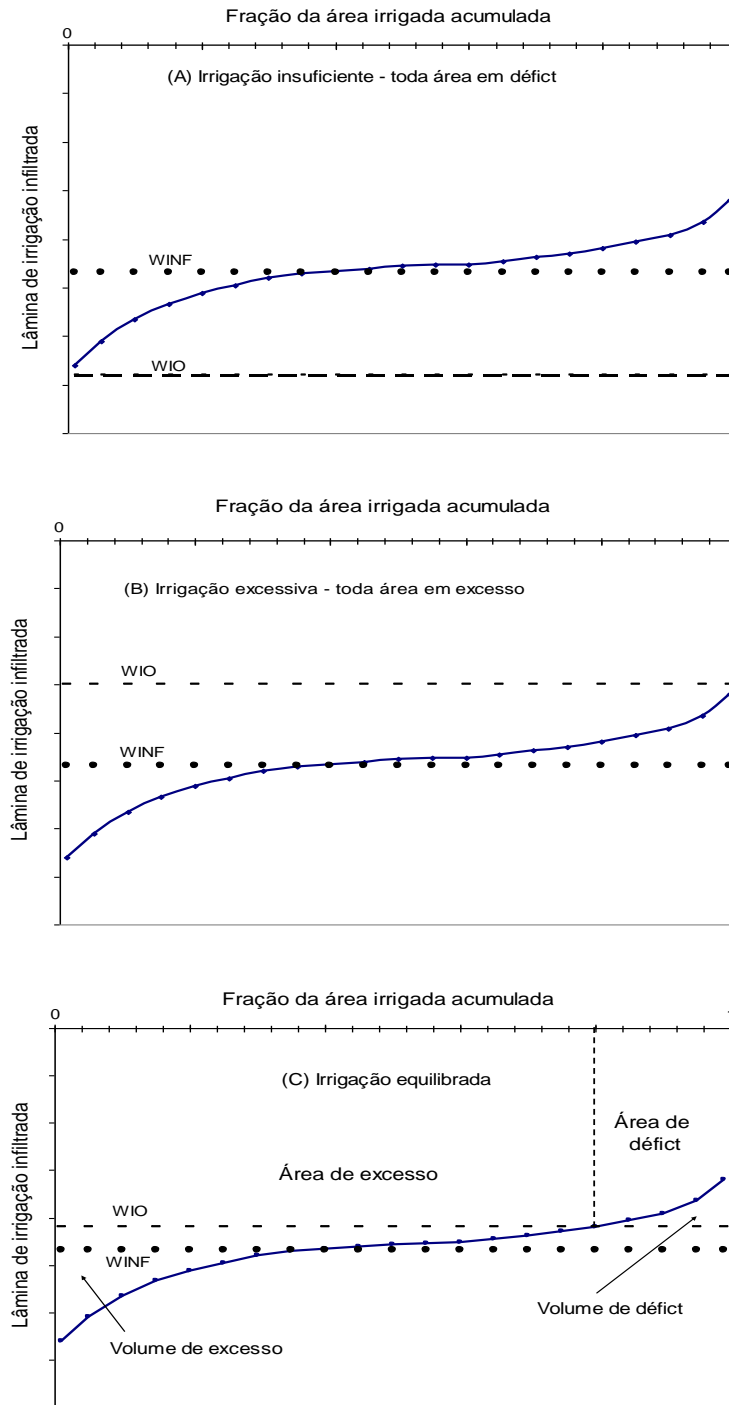


Figura 3 – Perfis de infiltração da água de irrigação no solo após um evento de irrigação (a) irrigação insuficiente; (b) irrigação excessiva; e (c) Irrigação equilibrada.

No exemplo da Figura 2 observa-se que a lâmina de irrigação requerida para satisfazer o déficit (WISMD) é 15 mm e a lâmina média armazenada no solo que contribui para satisfazer esse déficit é, exatamente, 15 mm, pois toda área recebeu uma lâmina de irrigação superior a 15 mm. Portanto, $ES = 100\%$. A ES é no máximo 100%, quando não há déficit de água no solo. Considerando o solo como um reservatório de água, WISMD é a quantidade de água necessária

para satisfazer o déficit de água no solo no momento da irrigação em toda a área. Esse déficit representa a diferença entre o armazenamento de água no solo à capacidade de campo e o armazenamento de água no solo na umidade atual. Hart et al. (1979) sugerem os seguintes valores para ES: excelente: $\geq 0,8$; satisfatório: $\geq 0,5$ e $< 0,8$; insatisfatório: $< 0,5$.

- **Razão Efetiva de Aplicação – REA%**

É uma medida da água de irrigação aplicada que deixou a área cultivada por outros meios que não a percolação, isto é, por escoamento superficial, por deriva pelo vento e por evaporação antes de infiltrar. Este parâmetro foi definido por Hart et al. (1979) como a fração da água aplicada por irrigação que foi infiltrada na parcela, Eq. (14):

$$REA = 100 \frac{WINF}{WIA} \quad (14)$$

Quando se previne o escoamento superficial, o complemento de REA representa uma estimativa da perda de água da parcela por evaporação mais deriva pelo vento. Para o exemplo da Figura 2, $REA = 100 (23,4/27) = 86,7\%$. Isto significa que a evaporação antes de atingir o solo mais a deriva pelo vento foi 13,3% da água aplicada. É importante observar que $EA = ED \times REA$.

Uniformidade

As medidas de uniformidade de distribuição de água expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo em relação ao valor médio. Uma forma usual de obtê-las é por coeficientes de uniformidade que utilizam medidas de dispersão, expressas de forma adimensional. Muitos coeficientes de uniformidade foram propostos desde Christiansen (1942).

- **Coefficiente de Uniformidade de Christiansen – CUC %**

Christiansen (1942) adotou o desvio médio absoluto como medida de dispersão. O desvio médio corresponde à média aritmética do valor absoluto da diferença entre cada lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo e a lâmina média. A expressão de CUC é a seguinte:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |W_i - \bar{W}|}{N \bar{W}} \right) \quad (15)$$

sendo:

N – o número de observações;

W_i – lâmina de água aplicada no ponto i , sobre a superfície do solo;

\bar{W} – lâmina média aplicada.

Esse coeficiente é o mais conhecido e largamente utilizado em sistemas de irrigação por aspersão, sendo que em geral, 80% é seu valor mínimo aceitável. Valores inferiores podem ser admitidos se a precipitação pluvial tem um valor significativo durante a estação de cultivo, ou se os custos do sistema são suficientemente reduzidos com a redução da uniformidade, compensando a diminuição do lucro devido à redução da produção da cultura. Quando CUC é utilizado em sistemas irrigação por superfície ou em microirrigação, as lâminas de água aplicadas na superfície do solo (W_i) e a lâmina média são substituídas por lâminas infiltradas no solo ou por vazões dos emissores, respectivamente.

Para calcular o CUC em sistemas de irrigação tipo pivô central é usual ponderar as lâminas de água aplicadas e coletadas nos pluviômetros, uma vez que cada coletor representa áreas progressivamente maiores, à partir do centro do pivô, Heermann e Hein (1968) propuseram como fator de ponderação a distância R_i do coletor i ao ponto do pivô. Assim, a equação proposta por Christiansen (1942) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N R_i |W_i - \bar{W}_p|}{\sum_{i=1}^N W_i R_i} \right) \quad (16)$$

sendo

$$\bar{W}_p = \frac{\sum_{i=1}^N W_i R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \text{ a lâmina média ponderada} \quad (17)$$

• **Coefficiente de Uniformidade de Wilcox-Swales – CUE %**

Wilcox e Swales (1947) utilizaram o desvio padrão como medida de dispersão e propuseram outro coeficiente de uniformidade, denominado coeficiente de uniformidade estatístico, com uso em aspersão e microirrigação (Eq. 18):

$$CUE = 100 \left(1 - \frac{s}{\bar{W}} \right) \quad (18)$$

sendo s o desvio padrão da média e \bar{W} a lâmina média aplicada por aspersão ou a vazão média dos emissores em microirrigação. Valores adequados de CUE são superiores a 75% para aspersão e de 85% para microirrigação.

Marek et al. (1986) relatam que o CUC não é sensível ao efeito das lâminas de irrigação muito dispersas em relação à média por utilizar o desvio absoluto médio como medida de dispersão. Os autores sugerem o uso do desvio padrão conforme a equação proposta por Wilcox e Swales (1947), pois essa medida de dispersão permite enfatizar os desvios maiores em relação à média, aumentando a sensibilidade do coeficiente de uniformidade, sendo útil especialmente para sistemas de irrigação pivô central quando apresenta problemas de obstrução ou danos mecânicos em emissores. Para pivô central o CUE deve ser calculado utilizando a lâmina média ponderada (Eq. 16) e desvio padrão ponderado (Eq. 19):

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N R_i (W_i - \bar{W}_p)^2}{\sum_{i=1}^N R_i}} \quad (19)$$

• **Coefficiente de Uniformidade de Hart - CUH %**

Hart (1961) propôs um coeficiente de uniformidade para aspersão convencional, também incorporando o desvio padrão. Esse coeficiente, expresso pela Eq. (20) foi sob o pressuposto de que as lâminas de água aplicadas por aspersão têm distribuição normal. Aceitam-se valores superiores a 75%.

$$CUH = 100 \left(1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{s}{\bar{W}} \right) \quad (20)$$

Se as lâminas de irrigação aplicadas têm distribuição normal, então $CUH = CUC$, pois pela propriedade da distribuição normal $\sum |W_i - \bar{W}|/N = s \sqrt{2/\pi}$. Sob essa consideração, o desvio padrão pode ser calculado em função de CUC e \bar{W} pela seguinte expressão:

$$s = \frac{\bar{W} (1 - CUC)}{0,8} \quad (21)$$

sendo CUC expresso em décimos.

Conhecendo-se a média e o desvio padrão é possível estimar a porcentagem da área que recebe no mínimo uma determinada quantidade de água. Essa informação pode ser utilizada para a previsão da produção desde que se conheça a função de produção água-cultura. A receita bruta proveniente da produção pode então ser comparada aos custos da irrigação com o objetivo de estabelecer estratégias ótimas de operação do sistema de irrigação (Paz et al., 1997). Entretanto, a hipótese de que as lâminas de irrigação têm distribuição normal é apenas parcialmente válida. Mesmo para valores de CUC relativamente altos (superiores a 85%), algumas distribuições de água não são tipicamente normais (Benami e Ofen, 1984).

Para aplicar CUH em irrigação por pivô central a média deve ser calculada pela Eq. (17) e o desvio padrão pela Eq. (19).

• Uniformidade de Distribuição – UD %

É definida pela razão entre a lâmina de irrigação média do menor quartil (W_{lq}) e a lâmina média geral (Eq. 22). A média do menor quartil representa a média das lâminas de irrigação aplicadas em de 25 % da área menos irrigada. Sua origem é creditada ao SCS-USDA quando foi nomeada por eficiência padrão. A UD tem sido aplicada em irrigação por superfície, irrigação por aspersão e microirrigação. Na irrigação por superfície consideram-se as lâminas de irrigação infiltradas e na microirrigação a vazão dos emissores.

$$UD = 100 \frac{W_{lq}}{\bar{W}} \quad (22)$$

A UD é utilizada como indicador dos problemas de distribuição da irrigação. Baixo valor de UD indica perda de água excessiva por percolação profunda. Isso ocorre quando a lâmina média em 25% da área menos irrigada é maior que $WISMD$. Considerando uma distribuição normal para W_i , os valores de UD são relacionados com CUC pela Eq. (23), segundo Keller e Bliesner (1990):

$$UD = 100 - 1,59 (100 - CUC) \quad (23)$$

Considerando uma distribuição normal para W_i , Hart (1961) propôs o cálculo de UD pela seguinte expressão:

$$UDH = 100 \left(1 - 1,27 \frac{s}{\bar{W}} \right) \quad (24)$$

Sendo $UD = UDH$ quando as lâminas de irrigação aplicadas têm distribuição normal. O coeficiente 1,27 significa que, em uma distribuição normal, a média do menor quartil ocorre a 1,27 s abaixo da média aritmética de todas as observações. Decorre desse valor que 10,22% da área recebem lâminas de irrigação inferiores à W_{lq} . Para pivô central devem-se utilizar valores ponderados de desvio padrão e lâminas médias.

Grau de adequação - A_R

O grau de adequação refere-se à fração da área que recebe a quantidade de água capaz de manter a qualidade do produto e a produtividade vegetal no nível econômico desejado pelo produtor. Ou seja, é a parte da área abrangida pelo sistema de irrigação que apresenta conformidade às necessidades do sistema de produção agrícola.

Como essa definição é muito ampla e requer as especificações da cultura, do solo e das condições de mercado, o grau de adequação é normalmente definido em relação à porcentagem da área que recebe no mínimo a lâmina de irrigação necessária para satisfazer o déficit.

A avaliação do grau de adequação é feita utilizando-se uma distribuição de freqüências acumuladas, conforme representado na Figura 4. Nessa figura mostra-se a porcentagem da área que recebe déficit ou excesso de água. A linha pontilhada representa a lâmina de irrigação que recebe a lâmina real necessária (WISMD). Nesse caso, o grau de adequação é 70% para WISMD = 17 mm, WINF = 18,8 mm, CUC = 85% e $s = 3,4$ mm. A curva de distribuição de freqüências é construída a partir das lâminas de irrigação coletadas durante os ensaios de distribuição de água do sistema. Para determinar o grau de adequação da irrigação em um sistema de aspersão procede-se da seguinte forma:

- ordene as lâminas de água de forma decrescente;
- calcule a fração da área representada pelo coletor (o coletor representa um elemento de área);
- calcule a fração da área acumulada (freqüência acumulada);
- faça o gráfico da fração da área acumulada *versus* lâminas de irrigação;
- determine a fração da área que recebe no mínimo a lâmina real necessária.

Segundo Merriam e Keller (1978), para culturas de alto valor econômico, com raízes pouco profundas, o sistema de irrigação mais econômico geralmente é aquele que proporciona alta uniformidade de distribuição de água: UD superior a 80% ou CUC superior a 88%. Para frutíferas, com raízes profundas, sob irrigação suplementar, pode-se admitir UD entre 50% e 70% ou CUC entre 70% e 82%. Para culturas com profundidade de sistema radicular média, os valores recomendados são: UD de 70% a 80% ou CUC de 82% a 88%.

Já Cuenca (1989) propõe valores de CUC com base na área adequadamente irrigada (A_R): culturas anuais extensivas – CUC = 80% e $A_R = 75\%$; frutíferas: CUC = 70% e $A_R = 50\%$; olerícolas: CUC = 85% e $A_R = 90\%$. Esse critério procura refletir o valor econômico da cultura; o custo do sistema de irrigação e a redistribuição de água no perfil do solo. Assim, os níveis de eficiência preconizados na irrigação planejada para satisfazer plenamente a demanda de água da cultura são aqueles possíveis de obter com grau mínimo de adequação de 90%, para culturas com sistema radicular pouco profundo e de alta rentabilidade, 80% para culturas com profundidade média de sistema radicular e de médio valor econômico, ou de 75% para culturas com sistema radicular profundo. Desse modo, a irrigação tradicional é definida em termos da quantidade de água a ser aplicada para evitar déficit hídrico em 90%, 80% ou 75% da área.

Assim, no manejo tradicional da irrigação, as eficiências a serem atingidas são aquelas possíveis de serem obtidas com o grau de adequação e a uniformidade de distribuição de água especificadas. Hart (1979) propõe intervalo de valores para alguns índices de desempenho da irrigação na parcela (Tabela 1).

Tabela 1 – Índices de desempenho sugeridos por Hart (1979)

Parâmetro	Excelente	Satisfatório		Não satisfatório
ES	$\geq 0,80$	$\geq 0,50$	$< 0,80$	$< 0,50$
ED	$\geq 0,80$	$\geq 0,50$	$< 0,80$	$< 0,50$
UD	$\geq 0,90$	$\geq 0,70$	$< 0,90$	$< 0,70$
REA	$\geq 0,80$	$\geq 0,60$	$< 0,80$	$< 0,60$

• Relação entre uniformidade e percolação

A relação entre uniformidade de distribuição de água e perda por percolação, para $A_R = 50\%$, é esquematizada na Figura 4. Para $CUC = 75\%$ os volumes de excesso e de déficit são maiores que para $CUC = 90\%$. Quando a uniformidade de distribuição é alta, mesmo que o grau de adequação seja apenas 50% , os volumes de excesso e de déficit não são elevados, resultando efeitos menos adversos sobre a produção das culturas e à economia da irrigação.

Em uma irrigação com alto grau de adequação a perda por percolação é maior para o sistema com $CUC = 75\%$, resultando menor eficiência de distribuição comparada com $CUC = 90\%$. Dessa forma, os critérios de projeto e as estratégias de irrigação que visam elevados índices de uniformidade têm possibilidade de atingir alta eficiência de distribuição mesmo quando a irrigação é realizada com alto grau de adequação. Contudo, mesmo para irrigações com alta uniformidade, a ED depende da quantidade de água aplicada.

A importância da uniformidade na determinação da lâmina ótima tem sido amplamente reconhecida, mas análise quantitativa universal ainda não foi desenvolvida. A lâmina ótima é influenciada pelo custo da água, custo do capital investido no sistema, uniformidade de distribuição, eficiência de aplicação e valor econômico da cultura.

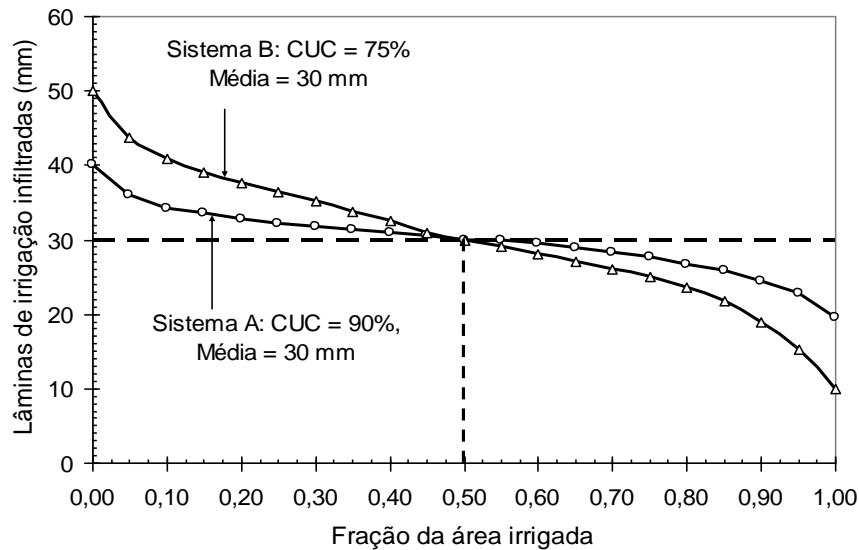


Figura 4 – Distribuição de água para grau de adequação de 50% e dois níveis de uniformidade (CUC) com lâmina média infiltrada de 30 mm .

• Relação entre grau de adequação e eficiência de distribuição

A relação entre A_R e ED está esquematizada na Figura 5. Observa-se que se o sistema aplica água de acordo com a curva A e a lâmina de irrigação necessária é 27 mm , o grau de adequação é 76% . Se esse mesmo sistema opera segundo a curva B, com a mesma uniformidade, para satisfazer 27 mm o grau de adequação é 38% . Nesse caso, com grau de adequação de 76% o sistema B satisfaz apenas uma necessidade de irrigação de 23 mm . A área a+b representa a quantidade de percolação caso o sistema opere segundo as condições A. A área b representa a percolação considerando a condição de operação B.

A redução do grau de adequação possibilita um aumento na eficiência de distribuição. Esse aumento decorre do aumento da área deficientemente irrigada. Irrigação com déficit, em geral, resulta diminuição da produtividade, mas pode ser mais econômica, caso não ocorra problemas de acúmulo de sais no perfil do solo. Entretanto, elevado grau de déficit, além de reduzir a produtividade pode afetar a qualidade do produto e ser antieconômico. Portanto, para maximizar

o retorno econômico é necessário estabelecer um equilíbrio entre os benefícios associados à alta ED e a redução da receita bruta pela menor produtividade e qualidade do produto.

De acordo com Duke et al. (1992), o aumento do CUC de 81,8% para 96,8% equivale a reduzir a vazão em 27% quando se usa a estratégia de manejo com grau de adequação de 75%. Heinemann e Frizzone (1995) concluíram que o aumento do CUC, em sistema pivô central, de 81,2% para 94,0% para os graus de adequação de 75%, 80% e 85% foi responsável por uma economia no volume de água aplicada de 11,9%, 14,2% e 16,7%, respectivamente.

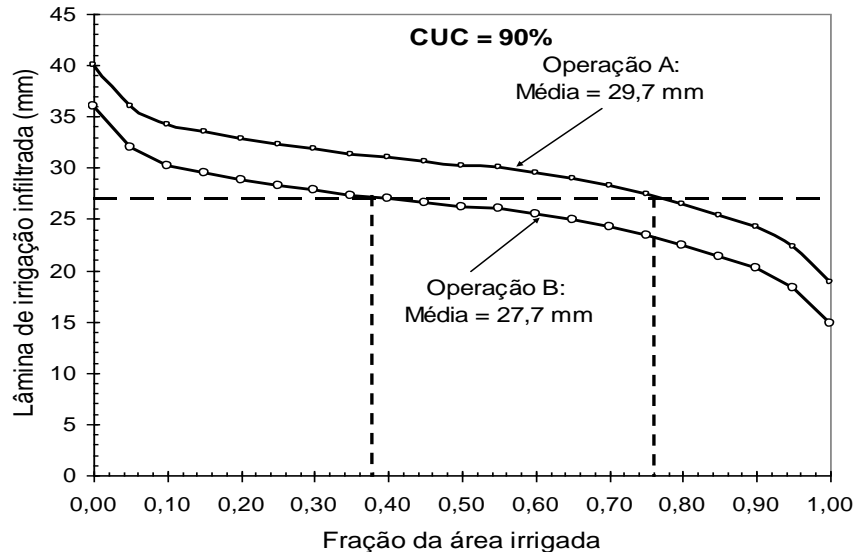


Figura 5 – Relação entre grau de adequação e eficiência de distribuição

• Efeito do custo da água e da uniformidade na receita líquida

Paz et al. (1997) mostraram a importância de elevados valores de uniformidade de distribuição de água na irrigação do feijoeiro (Figuras 6 e 7): (a) com alta uniformidade, a redução da receita líquida causada pelo déficit de água é pequena e pouco influenciada pelo custo da água (b) com baixa uniformidade a redução da receita líquida por déficit de água diminui com o aumento do preço da água; (c) para qualquer preço da água, quanto menor a uniformidade maior é o efeito do déficit de água sobre a redução da receita líquida; (d) o excesso de irrigação acarreta maiores reduções da receita líquida em menores uniformidades de distribuição de água; (e) a redução da receita líquida por excesso de irrigação aumenta com o aumento do custo da água.

Heermann et al. (1992) salientam que altos valores de uniformidade de distribuição de água e de grau de adequação podem estar associados a elevados investimentos e custos operacionais e, nesse caso, nem sempre se obtém os maiores retornos econômicos. Quando a água não é escassa e a cultura tem alto valor econômico, é possível compensar a baixa uniformidade de distribuição pela aplicação de uma lâmina adicional à necessidade da cultura para reduzir a área de déficit (Duke et al., 1992 e Mantovani et al., 1996). Entretanto deve-se considerar que o aumento da lâmina de irrigação eleva os custos operacionais do sistema e aumenta as perdas de nutrientes por lixiviação. Esta representa não só uma perda econômica direta como também reduz a produção e pode contaminar o lençol freático. Como os gastos com recursos aumentam com a quantidade de água aplicada e a responsabilidade ambiental justifica um manejo racional da irrigação pode não ser prudente irrigar com elevado grau de adequação.

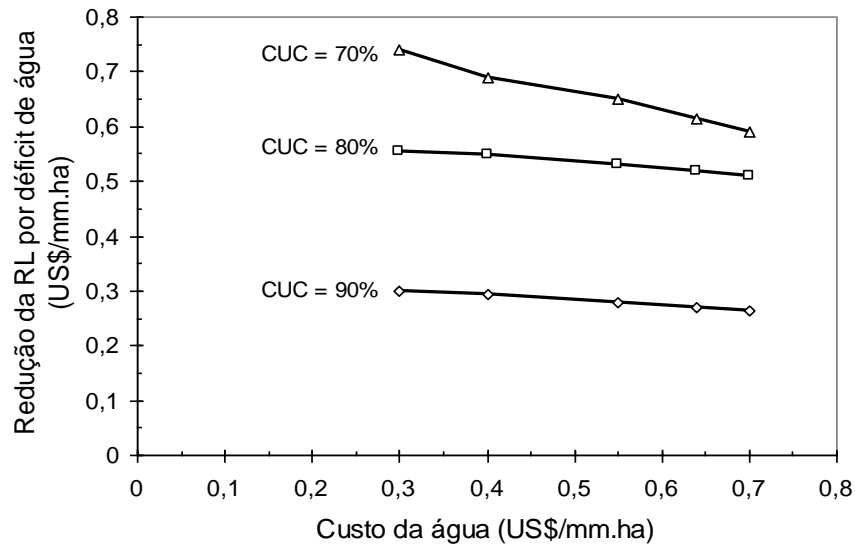


Figura 6 – Redução da receita líquida do feijoeiro por déficit de água aplicada, em função do custo da água, para um preço do produto de US\$ 0,44/kg.

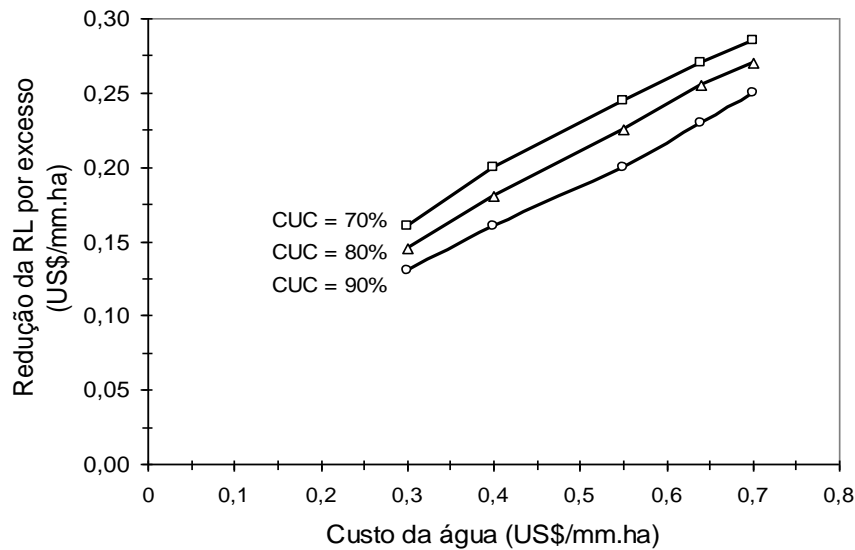


Figura 7 – Redução da receita líquida do feijoeiro por excesso de água aplicada, em função do custo da água, para um preço do produto de US\$ 0,44/kg.

FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Em irrigação, a água aplicada deve atender, preferencialmente, aos usos benéficos. Uma condição necessária a um desempenho satisfatório do sistema de irrigação é a obtenção de elevados níveis de uniformidade de distribuição de água e eficiência de aplicação e armazenagem de água. Os índices de uniformidade permitem avaliar a variação da quantidade de água infiltrada na área irrigada. A eficiência de aplicação representa a proporção da água aplicada à parcela que atinge o objetivo (permanecer disponível para absorção pelas plantas, lixiviar excesso de sais,

etc.). Já a eficiência de armazenagem avalia quanto à capacidade de armazenamento de água disponível do solo foi satisfeita pela irrigação, relativamente à quantidade requerida. Estes fatores devem ser considerados no manejo da irrigação resultante de qualquer sistema de irrigação e as práticas a serem adotadas dependem do sistema de irrigação considerado. Somente depois de uma avaliação criteriosa é possível identificar as prováveis causas de um desempenho insatisfatório e existem procedimentos normalizados para se proceder a esta avaliação. A melhora da uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação é a decisão mais importante para o manejo eficiente da água aplicada.

Sistemas de Irrigação por aspersão

(a) **Pressão de operação** – A água chega ao bocal do aspersor com certa carga de pressão que é transformada em carga de velocidade. O jato de água, lançado através do bocal, pulveriza-se em gotas de diferentes tamanhos e precipitam em uma área ao redor do aspersor. A área molhada e a distribuição da água dependem principalmente da pressão de operação, do tipo de bocal e do ângulo de saída do jato. Para um determinado diâmetro dos bocais, pressões elevadas ocasionam maior pulverização do jato, formando gotas de pequenos diâmetros que apresentam menor energia cinética e um atrito com o ar proporcionalmente maior, resultando menor alcance final, além de possibilitar um aumento das perdas por evaporação e deriva pelo vento, reduzindo a razão efetiva de aplicação. No caso de pressões de operação elevada, ocorre maior concentração de água próximo ao aspersor, propiciando menor uniformidade de distribuição.

Por outro lado, pressões baixas fazem com que o jato emergente do bocal se mantenha mais íntegro, resultando gotas de maiores diâmetros, as quais apresentam maior energia cinética e menor atrito com o ar, alcançando maiores distâncias, podendo se acumular na periferia do círculo molhado, causando também baixa uniformidade de distribuição.

Pressão de operação inadequada pode ser resultante de dimensionamento inadequado do conjunto motobomba, do diâmetro e do comprimento das tubulações, não prevendo corretamente as variações de pressão causadas pela perda de carga e pelo desnível geométrico do terreno. O envelhecimento das tubulações pode causar aumento da perda de carga e redução da pressão nos aspersores, assim como a falta de manutenção do conjunto motobomba pode reduzir a vazão recalçada e a altura manométrica. Com frequência a deficiência de pressão no sistema está associada a problemas no bombeamento (motobomba, tubulações de sucção e recalque).

Não sendo prático e nem econômico a manutenção de pressão constante em todos os aspersores ao longo da linha lateral, deve-se permitir um limite de variação aceitável ao longo dessa linha, dimensionando adequadamente seu comprimento e diâmetro. Em geral se aceita uma variação máxima de 20% da pressão de serviço, o que resulta, aproximadamente, 10% de variação de vazão.

(b) **Espaçamento entre aspersores** – Para se manter uma aceitável uniformidade de distribuição de água deve haver suficiente sobreposição dos perfis de distribuição dos aspersores. O grau de sobreposição depende das características do perfil de distribuição que, por sua vez, é função do tipo de aspersor, da pressão de operação e das condições de vento. Aspersores com espaçamentos maiores que os recomendados reduzem a uniformidade de distribuição o que conduz a um aumento nos volumes de déficit e de excesso de água, redução da eficiência de distribuição e de aplicação, aumento das perdas por percolação, aumento dos custos da irrigação e redução da produtividade.

(c) **Vento** – O vento exerce grande influência sobre a distribuição de água dos aspersores. Sob condições de vento, a área molhada sofre um desvio na forma, alongando-se no sentido da ação do vento e diminuindo no sentido oposto. A grandeza da distorção no padrão de distribuição dos aspersores é função da velocidade do vento, do tamanho das gotas e do espaçamento entre aspersores. Velocidades maiores e gotas de menores diâmetros favorecem a distorção do perfil de distribuição, resultando em menor uniformidade.

É comum adotar arranjo retangular entre aspersores, com o maior espaçamento entre linhas laterais. Nesse caso, quando o perfil de distribuição é aproximadamente triangular e os

ventos são fracos, espera-se um grau de uniformidade aceitável quando o espaçamento entre laterais é aproximadamente 60% a 65% do diâmetro molhado. Caso os aspersores tenham um perfil de distribuição tipicamente trapezoidal, o grau de sobreposição necessário é normalmente menor (espaçamento entre laterais de 70% a 75% do diâmetro molhado), mas o efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição é maior. O efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição de água pode ser reduzido quando se diminuem os espaçamentos dos aspersores, tanto ao longo das linhas laterais quanto entre elas.

Para Scaloppi (1986) a uniformidade de distribuição de água é mais influenciada pelo vento nos sistemas de irrigação cujos emissores operam estacionados, como na aspersão convencional e no rolamento lateral, ou então operam em faixas, como nos sistemas autopropelidos. O sistema do tipo pivô central, dotado de emissores proximamente instalados, apresentam desempenho menos influenciado pelo vento.

(d) **Altura do aspersor** – Os tubos de elevação se prestam para manter o aspersor a uma altura adequada em relação à copa das plantas e para eliminar ou reduzir a turbulência da água que chega ao aspersor, assegurando uma irrigação mais uniforme e eficiente. O tubo de elevação deve estar perpendicular à superfície do solo e bem acoplado à linha lateral para evitar instabilidade. Em geral é suspenso por tripé e sua altura depende do porte da cultura. Recomenda-se que o aspersor deve ser posicionado a uma altura de 0,30 a 0,50 m acima da copa das plantas. Em condições de vento fraco ou nulo o aumento da altura do aspersor promove aumento da uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersão convencionais (segundo Gomide, 1978, em média 2,2% para cada metro de altura). Entretanto, com o aumento da velocidade do vento pode-se esperar maiores perdas de água por evaporação e deriva e menor uniformidade de distribuição, principalmente em regiões quentes e secas. Além disso, tubos de elevação maiores aumentam o custo do sistema.

Em sistemas pivô central e linear móvel utiliza-se a colocação de tubos de descida para reduzir a altura do emissor em relação ao solo e reduzir a deriva de água pelo vento e a evaporação, permitindo aumentar a eficiência de aplicação. Embora essa seja uma estratégia comumente empregada, emissores muito próximos ao solo podem proporcionar alta intensidade de aplicação de água e, portanto, aumentar o potencial para deflúvio superficial, além de reduzir a sobreposição dos jatos e favorecer a redução da uniformidade de distribuição (James e Blair, 1984, Furukawa, 1991; Teixeira, 1992; Miranda et al, 1994). Nesse caso, a manutenção de alta uniformidade de distribuição de água depende da combinação entre o comprimento do tubo de descida e o tipo de placa difusora a se utilizar no emissor. Se tal combinação não for adequada poderá haver problemas de recobrimento e colisão de gotas (Silva, 1989).

(d) **Velocidade de rotação do aspersor** – O aumento da velocidade de rotação de aspersores rotativos de impacto promove redução do alcance do jato. Keller e Bliesner (1990) recomendam que a velocidade periférica de um aspersor deve estar entre 1 e 2 m s⁻¹. Por exemplo, um aspersor com 18 m de raio de alcance percorre 113 m de perímetro e o tempo ideal para uma rotação deve estar entre 57 e 113 s. Velocidade inferior a 1 m s⁻¹ geralmente resultam irregularidades no tempo de rotação do aspersor e, superior a 2 m s⁻¹, diminui o alcance do jato e proporciona desgaste prematuro do mancal do aspersor.

(e) **Tensão da mola do aspersor** – Altos níveis de tensão da mola resultam menores valores de uniformidade de distribuição de água (Coelho, 1990), além de aumentar o desgaste dos mecanismos envolvidos. O desempenho insatisfatório com elevadas tensões da mola está relacionado com a maior porcentagem de água desviada para próximo do aspersor, ocorrendo também maior pulverização do jato no momento do impacto com o defletor do jato. A ação do defletor no desvio da água é relativamente mais significativa em bocais de menores diâmetros.

(f) **Velocidade e alinhamento da linha lateral em pivô central e linear móvel** – O fato de os sistemas de irrigação pivô central e linear móvel não possuírem um movimento contínuo e uniforme de suas torres, devido a variações da velocidade, proporcionam uma redução da uniformidade de distribuição de água ao longo do seu deslocamento. Hanson e Wallender (1986) mediram esse

decréscimo da uniformidade em pivô central e linear móvel e relatam que a redução da uniformidade é mais pronunciada quando os sistemas são de baixa pressão.

Sistemas de microirrigação

Os sistemas de microirrigação incluem vários tipos de emissores de baixa pressão que diferem, principalmente, quanto a forma de descarregar a vazão. Muitos dos sistemas aplicam a água através de gotejadores ou microaspersores individuais. Os gotejadores são inseridos dentro dos tubos ou sobre os tubos. Alguns sistemas de gotejamento possuem orifícios em tubos de paredes duplas e outros tubos gotejadores possuem labirintos impressos no próprio tubo, por onde a água percorre, dissipa a pressão, e sai por um orifício. Existe uma diferença fundamental na avaliação de sistemas de microirrigação. O conceito de aplicar uma lâmina de água uniforme em toda a área é conflitante com as vantagens da microirrigação. Um princípio da microirrigação é reduzir a área molhada para minimizar as perdas por evaporação da superfície do solo e por transpiração de plantas daninhas. Como a água é aplicada nas proximidades das plantas, reduz o desenvolvimento de plantas daninhas entre as fileiras da cultura.

As principais causas do desempenho inadequado dos sistemas de microirrigação são:

(a) **Pressão de operação** – A vazão dos emissores é pequena uma vez que a seção de passagem da água é muito reduzida. Dessa forma, a vazão de um emissor não autocompensante é muito sensível à variação de pressão no sistema, sendo necessário o uso correto de reguladores de pressão na entrada das linhas de derivação. A operação do sistema com pressão incorreta pode resultar aplicação de quantidades de água muito diferentes das requeridas pela cultura. Diferenças de pressão em relação à necessária podem ser resultantes de projetos inadequados das tubulações e da motobomba, da seleção inadequada dos dispositivos de regulação de pressão, da obstrução do sistema de filtragem e do funcionamento deficiente dos reguladores de pressão. Excesso de variação de pressão no sistema, causados por perda de carga nas tubulações e por variação de nível do terreno decorre de um projeto mal dimensionado. Tubulações antigas podem ter a seção de escoamento reduzida por processos físicos ou químicos e aumentar a perda de carga, reduzindo a uniformidade de distribuição de água e a eficiência de aplicação. Recomenda-se que a variação máxima de pressão em uma subunidade de irrigação seja aquela que proporcione uma variação máxima de vazão entre os emissores igual a 10%.

(b) **Qualidade do emissor** – A seleção do emissor requer uma combinação de critérios objetivos e subjetivos. O procedimento de seleção consiste em se tomar decisão sobre a vazão do emissor, o espaçamento entre emissores, o número de emissores por planta e o tipo de emissor a ser selecionado. A qualidade da irrigação e a segurança do sistema dependem da seleção do emissor. Os emissores devem apresentar um conjunto de características de qualidade, de forma a atender os seguintes requisitos gerais: (i) apresentar vazão pequena e pouco sensível às variações de pressão; (ii) apresentar pequena sensibilidade à obstrução, (iii) apresentar resistência à ação química e do ambiente; (iv) apresentar estabilidade temporal da relação vazão-pressão; (v) apresentar pequena variação de fabricação, (vi) apresentar pequena sensibilidade às variações de temperatura, (vii) produzir pequena perda de carga localizada no sistema de conexão emissor-lateral, (viii) possuir baixo custo. Esses objetivos não são atingidos facilmente no projeto de um emissor porque eles são, de certa forma, paradoxais. Por mais cuidadoso que seja o processo de fabricação, dificilmente se obtém emissores iguais e, portanto, uma certa amostra de emissores terá um coeficiente de variação de vazão, que irá refletir na uniformidade e eficiência da irrigação no campo. Para emissores novos, regulados e não regulados, recomenda-se que o coeficiente de variação de fabricação não exceda 7%, assim como a vazão média de uma amostra não deve divergir de $\pm 7\%$ da vazão nominal.

(c) **Obstrução dos emissores** – A obstrução dos emissores, por processos químicos, físicos ou biológicos, é considerada o mais sério problema em microirrigação, exigindo medidas preventivas. A obstrução afeta a taxa de aplicação de água e a uniformidade de distribuição de água, aumentando os custos de manutenção, reposição de peças e recuperação, e com inspeção. Pode

ocorrer diminuição da produção e danos às culturas se a obstrução não for detectada e eliminada em tempo hábil. Duas alternativas têm sido apresentadas para minimizar o problema. A primeira é o desenvolvimento de emissores menos sensíveis à obstrução e a segunda é melhorar a qualidade da água de irrigação. A manutenção preventiva incluindo filtragem da água, tratamento químico, lavagem das linhas laterais e inspeções de campo, é provavelmente a solução mais efetiva para evitar os danos da obstrução dos emissores.

Sistemas de irrigação por superfície

Os problemas de uniformidade de distribuição de água e eficiência de aplicação e armazenagem resultam de variações da quantidade de água infiltrada na área irrigada que estão relacionados ao tempo de avanço, ao tempo de reposição da lâmina de irrigação, à vazão derivada à parcela, à taxa de infiltração do solo, à declividade da superfície de escoamento, etc. Alguns fatores que afetam o desempenho da irrigação por superfície são apresentados a seguir:

Fatores que afetam a uniformidade de distribuição de água:

(a) Dimensionais

- comprimento excessivo das parcelas;
- sistematização grosseira do terreno;
- vazão derivada à parcela muito pequena;
- tempo de aplicação de água muito reduzido.

(b) Solo

- variações na textura e estrutura, na condição superficial, no ter de água, compactação diferencial ao longo da parcela (natural ou provocada por tráfego de veículos, máquinas e implementos).

(c) Variação da seção de escoamento superficial

- por erosão ou por tratos culturais manuais ou mecanizados;
- por ocorrência de erosão superficial decorrente da própria irrigação ou chuvas.

(d) Variação da resistência ao escoamento superficial

- por desenvolvimento de plantas na superfície de escoamento ou por tratos culturais.

As principais práticas de manejo a serem adotadas para melhorar o desempenho dependem da natureza do problema. Para aumentar a uniformidade de distribuição de água podem ser adotadas as seguintes práticas: (a) aumentar a vazão de avanço; (b) aumentar o tempo de aplicação; (c) reduzir o comprimento da parcela; (d) aumentar o gradiente de declive; (e) aumentar a taxa de infiltração no final das parcelas através da incorporação de material orgânico ou revolvimento da superfície do solo; (f) construir diques para contenção de água no final das parcelas; (g) compactar de maneira diferenciada a superfície de escoamento, decrescente em direção ao final da parcela; (h) adotar um sistema de fluxo pulsante, pois a aplicação de água à parcela em períodos curtos e alternados tem mostrado maiores taxas de avanço que a aplicação contínua da vazão.

Fatores que afetam a eficiência de aplicação e de armazenagem

(a) Dimensionais

- comprimento da parcela muito reduzido ou muito longo;
- vazão muito reduzida ou muito elevada;
- tempo de aplicação muito reduzido ou muito elevado.

(b) Variação das características de infiltração

- pelo desenvolvimento normal das irrigações;
- provocada por tratos culturais

- por tráfego de veículos, máquinas e implementos
- por variações espaciais das características do solo.

Para aumentar a eficiência de aplicação em irrigação por superfície devem-se reduzir as perdas por percolação profunda e por deflúvio superficial no final das parcelas. As seguintes técnicas podem ser adotadas: Para reduzir a perda por percolação profunda deve-se aumentar a vazão para reduzir o tempo de avanço; reduzir o tempo de aplicação de água para reduzir o tempo de infiltração; reduzir o comprimento das parcelas; reduzir a taxa de infiltração através da compactação da superfície de escoamento; reduzir o perímetro molhado da seção de escoamento modificando a forma da seção transversal dos sulcos; aumentar o gradiente de declive da parcela. Para a redução do deflúvio superficial no final da parcela deve-se reduzir a vazão após a água atingir o final das parcelas; reduzir o tempo de aplicação de água; aumentar o comprimento das parcelas; reduzir o gradiente de declive; aumentar a taxa de infiltração através da incorporação de material orgânico ou revolvimento da superfície do solo; aumentar o perímetro molhado da seção de escoamento, modificando a forma da seção transversal de escoamento; construir diques para contenção da água no final das parcelas; adotar um sistema de reutilização da água de deflúvio no final das parcelas.

Para aumentar a eficiência de armazenagem as seguintes alternativas são indicadas: reduzir a vazão derivada à parcela para reduzir o tempo de avanço; aumentar o tempo de aplicação para aumentar o tempo de infiltração; reduzir o gradiente de declive; aumentar a razão de infiltração; aumentar o perímetro molhado da seção de escoamento; construir diques para contenção da água no final das parcelas.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O manejo racional da irrigação pressupõe o uso criterioso do recurso hídrico disponível para se maximizar a produtividade das culturas com o uso eficiente da água, da energia, dos fertilizantes e de outros insumos empregados na produção, considerando os aspectos sociais e ecológicos da região. Outros objetivos também podem ser estabelecidos, como maximizar a receita líquida por unidade de volume de água ou por unidade de área irrigada.

As práticas convencionais de irrigação baseiam-se na necessidade de água da cultura, definida pela demanda evapotranspiratória, e na eficiência de aplicação de água. Para dar suporte à formulação de calendários de irrigação as pesquisas tem sido guiadas sob quatro enfoques de manejo da irrigação: irrigação total, irrigação suplementar, irrigação com déficit e irrigação de “salvação”.

Na **irrigação total**, toda água necessária para atender a demanda evapotranspiratória da cultura é proveniente da irrigação. Esse tipo de manejo é aplicado em regiões de clima árido ou semi-árido, ou em regiões onde a precipitação é insignificante. Na **irrigação suplementar**, a água necessária ao atendimento da demanda evapotranspiratória da cultura no intervalo entre duas irrigações consecutivas, é proveniente, em parte, da irrigação e, em parte, da precipitação pluviométrica efetiva. Nesse caso diz-se que a irrigação suplementará a precipitação efetiva no atendimento da demanda de água da cultura. Na **irrigação com déficit**, planeja-se atender somente uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração. Esse tipo de manejo pode ser praticado com irrigação total e com irrigação suplementar. O déficit de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou somente nas fases críticas ao déficit hídrico. Neste último caso, são possíveis menores reduções na produtividade da cultura. Na **irrigação de salvação**, o objetivo é irrigar somente num período relativamente curto ou num estágio do cultivo. Exemplo típico ocorre na irrigação da cana-de-açúcar, onde se aplica por irrigação, a vinhaça ou a água proveniente da lavagem da cana, em duas ou três aplicações de 30 a 60 mm por mês, após o plantio para cana planta, ou após os cortes para cana soca (Matiole, 1998, Bernardo, 2006). Esse tipo de manejo também tem sido utilizado na cultura do milho, no período do pré-pendoamento, e

na cultura do feijão, antes da floração e na formação dos grãos, quando ocorre falta de chuvas nesses períodos.

São duas as estratégias para o manejo da irrigação: (a) suprir totalmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou irrigação suplementar – atendimento pleno da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação sem déficit, e (b) suprir parcialmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou suplementar – atendimento parcial da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação com déficit.

Na irrigação sem déficit, o objetivo é aplicar uma quantidade média de água, capaz de suprir totalmente o déficit hídrico e de proporcionar a máxima produção por unidade de área, evitando perda de produtividade ou de qualidade do produto por deficiência de água. Com esse objetivo fica implícito que a disponibilidade de água não é fator limitante da produção. Como a aplicação de água não é totalmente uniforme no espaço, o excesso de água poderá reduzir a produção da cultura pela redução da aeração do solo, por lixiviação de nutrientes e por doenças associadas a solos úmidos. Os níveis de eficiência técnica preconizados na irrigação planejada para satisfazer plenamente a demanda de água da cultura são aqueles possíveis de obter com um grau mínimo de adequação da irrigação de 90%, para culturas de alto ou médio valor econômico, ou de 75% para culturas de baixo valor econômico (Cuenca, 1989). A irrigação convencional é, desse modo, definida em termos da quantidade de água a ser aplicada para evitar déficit hídrico em 90% ou 75% da área. Esses índices constituem, até hoje, os fundamentos da irrigação padrão em todo o mundo. O grau de adequação se refere à fração da área que deve receber água suficiente para evitar perdas de produtividade ou de qualidade do produto. A irrigação para atender plenamente a demanda de água da cultura é um problema relativamente simples e claramente definido, com o objetivo de maximizar a produção por unidade de área.

Na irrigação com déficit, o objetivo é maximizar a produção por unidade de volume de água aplicada (eficiência de uso da água – eficiência produtiva, atualmente denominada produtividade da água). Com esse objetivo, visa-se a aumentar a eficiência de uso de água e economizar água pelo aumento da eficiência de aplicação (eficiência técnica), redução das perdas de água e redução da eficiência de armazenagem (Phene, 1989), pressupondo-se que a disponibilidade de água constitui limitação à produção agrícola e que o manejo da irrigação deve priorizar a minimização das perdas de água. Se a lâmina de irrigação for menor que a evapotranspiração da cultura no período (irrigação com déficit), o grau de adequação será reduzido, as produtividades serão menores, mas, como resultado, reduz-se a percolação, aumenta-se a eficiência de aplicação e há redução nos custos operacionais da irrigação e redução da lixiviação de produtos químicos.

Uma mudança fundamental deverá ocorrer no manejo da irrigação nos próximos anos, em decorrência das pressões econômicas sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais da irrigação. Tais fatores motivarão uma mudança de paradigma da irrigação, enfocando-se, além da eficiência técnica/produtiva, a eficiência econômica. Esse novo enfoque pode ser descrito simplesmente como “otimização” e o argumento é que a mudança é fundamental, desejável e inevitável e será um avanço significativo nas práticas atuais, já que uma produção eficiente e rentável deve constituir o principal objetivo econômico de uma empresa agrícola. A otimização da irrigação considera explicitamente os custos e os lucros, porém, maximizar a lucratividade é um problema substancialmente mais complexo e desafiador. Identificar estratégias ótimas de irrigação necessitará de modelos detalhados das relações água-cultura e eficiência de irrigação. Fatores econômicos, como custos de produção, preços do produto, custos de oportunidade da água, deverão ser explicitamente incorporados nas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-GHOBAR, H.M. Losses from low-pressure center-pivot irrigation systems in a desert climate as affect by nozzle height. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.21, n.1/2, p.23-32, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Describing irrigation efficiency and uniformity. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.104, n.1, p.35-41, 1978.

BENAMI, A.; OFEN, A. **Irrigation Engineering: Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation – Principles, and design and agricultural practice**. Haifa: Irrigation Scientific Publications, 1984. 257p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6.ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A.; EISENHAEUER, 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**, Amsterdam, v.40, n.1, p.37-44, 1999.

COELHO, R.D. **Regulagem de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas**. 1990. 1419. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkler**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. (Bulletin, 670).

CUENCA, R.H. **Irrigation systems design: an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 551p.

DUKE, H.R.; HEERMANN, D.F.; DAWSON, L.J. Appropriate depths of application for scheduling center pivot irrigations. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.35, n.5, p.1457-1464, 1992.

FURUKAWA, C. **Avaliação da irrigação por pivô central na região de Rio Verde – GO**. Viçosa , 1991,. 69p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

HANSON, B.R; WALLENDER, W.W. Bidirectional iniformity of water applied by continuous-move sprinkler machines. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.4, p.1047-1053, 1986.

HART, W.W. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.42, n.7, p.354-255, 1961.

HART, W.E., PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.3, p.275-288, 1979.

HEERMANN, D.F.; HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v11, n1, p.11-15, 1968.

HEERMANN, D.F.; WALLENDER, W.W.; BOS, M.G. Irrigation efficiency and uniformity. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, K.H.; SOLOMON, K.H. (Ed.). **Management of Farm Irrigation Systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992, p.125 - 149.

HEINEMANN, A.B; FRIZZONE, J.A. Custo da melhoria da uniformidade de distribuição de água por um pivô central vs. economia de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., Viçosa, 1995. Anais. Viçosa: SBEA, 1995. p.189.

ISRAELSEN, O.W. **Irrigation principles and practices**, New York: Wiley, 1950, 471p.

JAMES, L.G.; BLAIR, S.K.; Performance of low pressure center-pivot systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.27, n.6, p.1753-1757, 1984.

JENSEN, M.E. Beyond irrigation efficiency. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.25, n.4, p.233-245, 2007.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 651p.

MANTOVANI, E.C.; VILLALOBOS, F.J.; ORGAZ, F.; FERERES, E. Modelling the effects of sprinkler uniformity on crop yield. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.27, n.3/4, 1995.

MAREK, T.U.; UNDERSANDER, D.J.; EBELING, L.L. An aerial weighted uniformity coefficient for pivot irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.6, p.1665-1670, 1986.

MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar: modelo de decisão para o estado de São Paulo**. 1998, 122p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1998.

MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978, 271p.

MIRANDA, F.R.; RAMOS, M.M.; DENÍCULI, W.; SOARES, A.A. Uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação do tipo linear de baixa pressão, em função da altura de instalação e do tipo de placa defletora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., Campinas, 1994. **Anais**. Campinas: SBEA, 1994. p.1-8.

PAZ, V.P.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FOLEGATTI, M.V. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.404-408, 2002.

PEREIRA, L. S. Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.40, n.2, p.153-169, 1999.

PHENE, C.J. Techniques for computerized irrigation management. **Computer and Electronics in Agriculture**, New York, v.3, n.3, p.189-208, 1989.

SCALOPPI, E.J. Sistemas de irrigação por superfície. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.12-26, 1986.

SILVA, W.L.C. Considerações sobre o uso de “sprays” de baixa pressão em pivô central. **ITEM Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.39, p.26-32, 1989.

SOLOMON, K.H.; BURT, C.M. Irrigation Sagacity: a measure of prudent water use. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.18, n.3, p.135-140, 1999.

TEIXEIRA, A.S. **Estudo do efeito de diferentes tipos de emissores na performance de um sistema de irrigação por aspersão pivô central**. 1992. 79p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1992.

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v.27, n.11, p.565-583, 1947.

WANG, Z.; ZERIHUM, D., FEYEN. General irrigation efficiency for field water management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.30, n.2, p.123-132, 1996.