

NECESSIDADE DE ÁGUA PARA 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

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 colhido.

(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 escoam 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 semeadura, 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 agronômico. 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 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, são exemplificados os tipos de usos 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;
- Evaporação de solo úmido;
- Evaporação da água aplicada por aspersão;
- Água utilizada em lavagem de filtros;
- Água para satisfazer algum propósito ambiental;
- Água necessária para manter o padrão de qualidade de drenos;
- Água percolada por incertezas no manejo da irrigação;
- Água percolada 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.

RETENÇÃO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO

Constituição do solo

O solo é um material poroso constituído de três fases que se interagem: sólida, líquida e gasosa. Esse material poroso serve de apoio físico (sustentação) e, químico e biológico (nutrição) para o desenvolvimento da maioria dos vegetais. Uma de suas importantes funções é de funcionar como um reservatório de água e nutrientes (solução do solo) para utilização pelas plantas. Solos contendo mais que 85 % de matéria mineral inorgânica são chamados de solos minerais e aqueles contendo mais de 15 % de matéria orgânica são chamados de solos orgânicos. A fração líquida é representada pela solução do solo e a gasosa é composta pelo ar do solo que contém vapor d'água e certa quantidade de O₂, CO₂, N₂, NH₃ e outros gases.

A fase sólida do solo é constituída de matéria mineral e orgânica de diferentes formas, tamanhos, constituição e orientação, constituindo a matriz do solo. A distribuição dos componentes sólidos quanto à forma e arranjo no perfil do solo é denominada de estrutura e a parte do solo não ocupada pela matriz é o espaço poroso. O arranjo, a organização e a orientação das partículas determinam o espaço poroso disponível para a penetração de líquidos, como a solução do solo, e de gases como vapor d'água, CO₂, etc. A fração gasosa, tão importante do sistema solo, ocupa os espaços vazios não ocupados pela água. Na prática da irrigação, é importante manter certo balanço entre a porção dos poros ocupada pela água e ocupada pelo ar. A composição, em volume, de um solo ideal tem as seguintes proporções: fração mineral: 45 %; fração orgânica = 5 %; fração água = 30 % e fração ar = 20 %.

Quando o espaço poroso do solo está totalmente ocupado pela água diz-se que o solo está saturado. À medida que ocorre a drenagem da água o ar entra no espaço poroso e, nestas condições, diz-se que o solo está não saturado (espaço poroso com água e ar). Na Figura 1 representa-se esquematicamente um volume de solo hipotético mostrando as relações massa-volume das três fases, cujas variáveis são definidas a seguir:

V_a – volume de ar;	M_a – massa de ar (≈ 0);
V_w – volume de água;	M_w – massa de água;
V_s – volume de sólidos;	M_s – massa de solo seco ou de sólidos;
V_t – volume total;	M_t – massa total;
V_p – volume de poros = $V_w + V_a$;	$M_t = M_a + M_w + M_s \approx M_w + M_s$
$V_t = V_a + V_s + V_w$	

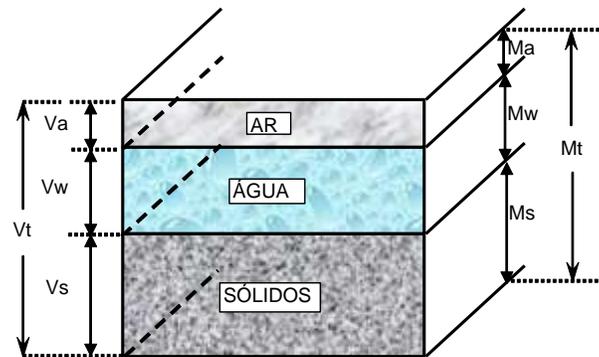


Figura 1 – Relações massa-volume dos constituintes do solo

Os poros do solo são, grosseiramente, classificados em dois grupos: (a) macroporos – poros com diâmetro superior a 0,01 mm; sua principal função é aeração da matriz do solo, infiltração e condução de água; (b) microporos – poros com diâmetro inferior a 0,01 mm; são também chamados poros capilares e atuam na armazenagem de água.

Textura do solo

A textura do solo refere-se à distribuição do tamanho das partículas do solo. A escala de tamanho é muito variável, desde cascalho de diâmetro da ordem de centímetros, até partículas muito pequenas, como os coloides, que não podem ser vistos a olho nu. O tamanho das partículas tem grande importância, pois determina o número de partículas por unidade de volume ou de massa do solo e a superfície que essas partículas expõem (superfície específica). O aumento da superfície específica com a diminuição do tamanho das partículas é de fundamental importância para as propriedades de retenção de água e nutrientes do solo. A determinação do tamanho das partículas do solo é feita em laboratório e é denominada análise mecânica do solo.

As proporções de partículas grosseiras, médias e finas, denominadas de areia, silte (ou limo) e argila determinam combinações que são utilizadas para classificar o solo segundo sua textura. Denominam-se de areia as partículas com diâmetros entre 2 mm e 0,05 mm; de silte ou limo as partículas com diâmetros entre 0,05 mm e 0,002 mm e de argila com diâmetros menores que 0,002 mm. De acordo com as proporções dessas três frações definem-se as classes texturais dos solos, cuja representação é feita em um triângulo textural (Figura 2).

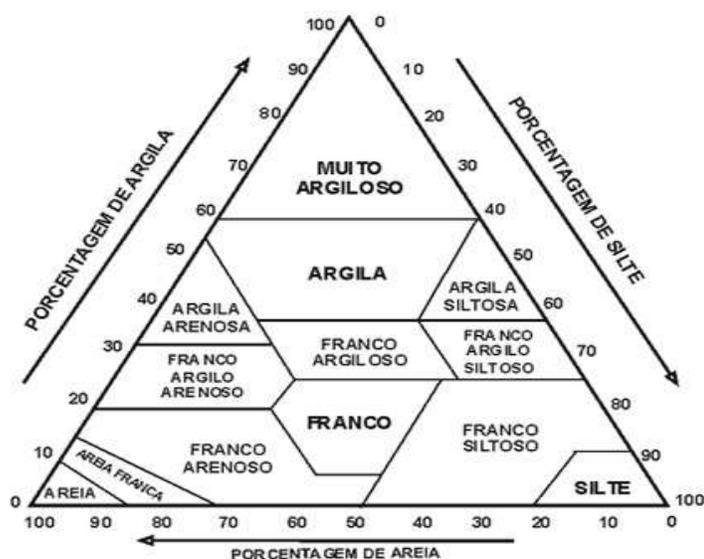


Figura 2 – Triângulo textural (Fonte: Soares e Silva, 2005)

Determinando-se as porcentagens de areia, silte e argila para uma amostra de solo, por análise do tamanho de partículas, pode-se utilizar o triângulo de classe textural para determinar a classe textural do solo aplicada a esta amostra. Para usar o gráfico, primeiro deverá ser localizada a adequada porcentagem de argila no lado esquerdo do triângulo e, em seguida, traça-se uma linha paralela à base do triângulo. Depois, encontra-se a porcentagem de areia na base do triângulo e, então, traça-se uma linha paralela ao lado do triângulo relativo à porcentagem de silte. O ponto no qual as duas linhas se interceptam indica a classe textural da amostra de solo. Somente as porcentagens de duas das três frações são necessárias. A soma das porcentagens de areia, silte e argila é 100 %, portanto, a terceira porcentagem pode ser facilmente calculada se somente duas são conhecidas. Se as três porcentagens são utilizadas, as três linhas se interceptam no mesmo ponto. Considerando como exemplo, um solo que contenha 15 % de areia, 15 % de argila e 70 % de silte, as três linhas se interceptam na classe textural franco siltoso. Da mesma forma, um solo que contenha 33 % de argila, 33 % de areia e 34 % silte é da classe textural franco argiloso.

Como exemplo, algumas texturas de importância são:

- (a) Arenosa – material que apresenta teores de areia maiores que 85 %. É um solo solto em grãos individuais que podem ser vistos e sentidos pelo tato. Quando seco, colapsa ao ser comprimido entre os dedos, perdendo a estrutura; quando molhado, pode ser moldado, mas colapsa quando tocado.
- (b) Areia franca – tem mais silte e argila que a areia: 70% a 85 % de areia e a porcentagem de silte e argila é maior que 15%. Não colapsa com tanta facilidade quando seca e pode ser mais bem moldada quando úmida.
- (c) Franca arenosa – material com alto teor de areia, mas com quantidade suficiente de silte e argila para se apresentar mais coeso. Possui teores de areia maiores que 52 % e os teores de argila e de silte são menores que 30 %. Pode-se ver ou sentir a areia que contém e, quando seco, esboroa-se sob pressão dos dedos e, quando úmido, pode ser moldado com facilidade.
- (d) Franca – esta classe de solos apresenta as três frações em proporções equilibradas e ocupa uma posição central no triângulo textural: menos de 52 % de areia, 7 % a 27 % de argila e 28 % a 50 % de silte. O solo quando úmido é macio e ligeiramente plástico e quando seco suporta manuseio suave.
- (e) Franca siltosa – solo com pouca areia, pouca argila e com predominância de silte. Quando seco forma torrões que se partem facilmente e pode ser moldado tanto seco quanto úmido. Possui mais de 50% de silte, 12 % a 27 % de argila e de areia.
- (f) Franca argilosa – quando seco forma torrões duros e quando úmido se apresenta plástico, podendo ser manuseados sem se romper. Contém 27 % a 40 % de argila, 20 % a 45 % de areia e 15% a 52 % de silte.
- (g) Argilosa – solos que formam torrões duros quando seco e, quando úmidos, são plásticos e moldam-se perfeitamente. Contêm mais de 40 % de argila, menos de 45 % de areia e menos de 40 % de silte.

Estrutura do solo

A estrutura do solo se refere ao arranjo das suas partículas e à adesão de partículas menores na formação de agregados. Ao contrário da textura, a estrutura pode ser modificada; pode ser mantida ou melhorada com práticas agrícolas adequadas, assim como deteriorada com manejo inadequado. No horizonte superficial do solo a estrutura é afetada pelo preparo do solo, pela deposição de material orgânico e pelo tipo de vegetação. Rotações de cultura e incorporação de material orgânico melhoram a estrutura do solo. A salinização do solo por práticas inadequadas de irrigação deteriora a estrutura, pois os agregados se desfazem devido à dispersão das argilas causada pela presença de altas concentrações salinas, principalmente sais sódicos, tornando o solo massivo e impermeável à água.

O conceito de estrutura é qualitativo e descritivo, não havendo meio prático para mensurar. Diz-se que um solo é bem estruturado, considerando-se boa a estrutura com muitos agregados, de forma granular, que se esboroa com facilidade quando úmida. Tem boa permeabilidade à água e ao ar, tem boas condições de aeração e de penetração de raízes. Já um solo sem estrutura tem concentração de massa, é pesado para ser trabalhado, apresenta dificuldades para a penetração da água e das raízes.

Potencial da água no solo

O estudo da água no solo é de grande interesse para a agricultura porque influencia no desenvolvimento e produção das culturas. Uma planta em desenvolvimento deve ser capaz de suprir a demanda de água da atmosfera através da quantidade que ela pode extrair do solo. O armazenamento de água no solo é deplecionado pela evapotranspiração e recomposto pela precipitação ou irrigação. A importância do armazenamento e da disponibilidade de água do solo na produção das culturas é reconhecida e muitas pesquisas são realizadas para caracterizar as propriedades do solo responsáveis pela absorção e retenção de água.

A consideração apenas do conteúdo de água não é um critério suficiente para descrever a disponibilidade de água do solo para as plantas e, por isso, tem-se envidado esforços para descrever o estado de energia da água. A princípio, foram desenvolvidas medidas e relações empíricas que formaram a base para a proposição de expressões e mecanismos fundamentais. A rigor, o sistema solo-água-planta deve ser tratado como um sistema dinâmico contínuo, no qual a água movimenta-se através do solo para as raízes das plantas, dentro delas e através das plantas para a atmosfera contra uma redução contínua da energia potencial.

A absorção da água do solo pelas plantas depende não somente da sua quantidade e estado de energia, como também da habilidade da planta para absorver água e da demanda hídrica da atmosfera. A quantidade de água que é suficiente para satisfazer a produção das plantas depende da espécie vegetal e de sua variedade, do estágio de desenvolvimento e do produto comercializado.

No início do século XX a água do solo era classificada em quatro grupos: (a) água gravitacional – aquela que momentaneamente enche os poros grandes do solo, mas que é arrastada pela ação da gravidade nos solos bem drenados; (b) água capilar – água retida nos poros do solo contra a ação da gravidade; desta, uma parte é mais móvel e disponível para as plantas, outra está mais fortemente unida às partículas do solo; (c) água higroscópica – água fortemente fixada pelas partículas de solo e não está disponível para as plantas; (d) vapor d'água – água que compõe a atmosfera do solo. Neste conceito, a água capilar é a única fonte importante de água para a maioria das plantas.

Não há, contudo, limites definidos entre esses diferentes grupos de umidade do solo e as teorias atuais indicam que a água não devesse ser classificada deste modo, devido à natureza contínua das funções de retenção e condutividade. Sugere-se que este conceito seja substituído pelo conceito fundamental referido como potencial de água no solo. A água do solo não varia em forma nos limites da nossa aplicação, mas varia o estado energético com que está retida no solo.

O trabalho necessário para mover um volume unitário de água do estado padrão no solo a um estado considerado é denominado potencial total da água no solo (ψ). Considera-se como estado padrão o estado da água pura e livre, submetida às condições normais de temperatura e pressão, colocada em determinada referência no campo gravitacional. Para este estado atribui-se arbitrariamente o valor de sua energia como nulo ($\psi_{\text{padrão}} = 0$).

A energia da água no solo, em determinado ponto, é dada pela diferença entre este estado e o estado padrão. Geralmente, no solo, na planta e na atmosfera, a energia da água é menor que do estado padrão e, conseqüentemente, seu potencial é negativo, pois, em ambientes não saturados, para se remover água é necessário haver dispêndio de energia. O gradiente de potencial, ou seja, a taxa de decréscimo da energia potencial com a distância, é a força motora que causa o fluxo de água. Assim, a água se movimentará de um solo úmido, com potencial próximo de zero, para um solo seco onde o potencial é menor (valor mais negativo).

A água no solo está submetida a diferentes forças que afetam seu estado de energia, sendo que, para nossos interesses, consideram-se quatro componentes principais:

- o campo gravitacional - ψ_g - potencial gravitacional;
- a pressão exterior - ψ_p - potencial de pressão;
- a interação com os sólidos do solo - ψ_m - potencial mátrico;
- a interação com os solutos - ψ_o - potencial osmótico.

Assim se terá o potencial total [equação (1)]:

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_o + \dots \quad (1)$$

Antes de estudar cada um desses componentes é importante definir as unidades que podem ser expressos. Seja E_p a energia potencial de um corpo [equação (2)]:

$$E_p = w Z = m g H = \rho V g H = \gamma V H \quad (2)$$

sendo: w o peso do corpo, H a altura que se encontra em relação a um plano de referência, m a massa do corpo, g a aceleração da gravidade, ρ a massa específica do corpo, V o volume e γ o peso específico do corpo.

Considerando-se que as unidades do sistema internacional é Joule = N . m, tem-se:

$$\psi_{peso} = \frac{E_p}{w} = H \quad \text{Energia por unidade de peso (m)}$$

$$\psi_{massa} = \frac{E_p}{m} = g H \quad \text{Energia por unidade de massa (Joule kg}^{-1}\text{)}$$

$$\psi_{volume} = \frac{E_p}{V} = \rho g H = \gamma H \quad \text{Energia por unidade de volume (N m}^{-2}\text{ = Pa)}$$

A relação entre elas será:

$$\psi_{peso} = \frac{\psi_{massa}}{g} = \frac{\psi_{volume}}{\rho g} \quad (3)$$

Já que,

$$\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\psi_{massa} = \frac{\psi_{volume}}{\rho}$$

tem-se:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N m}^{-2} = 100 \text{ J kg}^{-1}$$

$$1 \text{ atm} = 1,033 \text{ kg}_f \text{ cm}^{-2} = 10,13 \times 10^4 \text{ N m}^{-2} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$$

sendo kg_f o quilograma força ($1 \text{ kg}_f = 1 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m s}^{-2} = 9,8 \text{ N}$)

Para fins práticos, pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar} \approx 1 \text{ kg}_f \text{ cm}^{-2} \approx 100 \text{ kPa} \approx 10 \text{ m.c.a}$$

$$1 \text{ cbar} \approx 1 \text{ cm.c.a.}$$

Potencial gravitacional: é a energia que uma quantidade unitária de água possui, em um sistema solo-água em equilíbrio num nível arbitrário, em relação à energia da água em outro sistema em equilíbrio, idêntico em todos os aspectos ao primeiro, exceto de que está no nível de referência. Em energia por unidade de peso, corresponde ao desnível geométrico (z_g) do ponto considerado em relação a um plano de referência arbitrário. É positivo quando está acima do plano de referência e negativo quando está abaixo.

$$\psi_g = z_g \quad (4)$$

ψ_g representa o trabalho envolvido em levar a água, dentro do campo gravitacional, de um referencial no qual $\psi_g = 0$ até um ponto qualquer desejado, onde, em energia por unidade de peso $\psi_g = z_g$. Geralmente considera-se a superfície do solo como referencial.

Potencial de pressão: é o trabalho realizado por uma pressão. O componente ψ_p aparece quando a pressão que atua sobre a água do solo é maior que a pressão atmosférica padrão; portanto ocorre em solo saturado e, neste caso, ψ_p é positivo. Se a pressão a qual a água está sujeita em dado ponto no solo é igual à atmosférica (solo não saturado) tem-se $\psi_p = 0$. No solo saturado ψ_p representa a pressão hidrostática (P_h) que a água exerce no ponto considerado. Sendo z_p a profundidade do ponto considerado no perfil do solo, em relação à superfície da água livre, em energia por unidade de peso, tem-se:

$$\psi_p = \frac{P_h}{\gamma} = z_p \quad (5)$$

Potencial mátrico: corresponde à energia que uma quantidade unitária de água, em um sistema solo-água em equilíbrio possui, em relação à energia da água em outro sistema, idêntico ao primeiro, exceto de que não existe a presença de uma matriz. O componente ψ_m só existe em solo não saturado, onde existem pressões negativas. O ψ_m ocorre em resposta às interações entre a matriz do solo e a água (ou solução do solo), incluído forças associadas com a adsorção e capilaridade, responsáveis pela retenção de água no solo. Portanto, para remover água do solo, retida por estas forças, é necessário dispender de energia e quanto menor o teor de água do solo, maior é este dispêndio. Dessa forma, é conveniente considerar o potencial mátrico como uma função contínua da umidade do solo. Seu valor é sempre negativo e, num solo saturado, $\psi_m = 0$. O potencial mátrico pode ser medido em campo utilizando tensiômetros e, no laboratório, utilizando equipamentos denominados câmara de pressão de Richards e funil de placa porosa. Potencial hidráulico a soma $\psi_H = \psi_g + \psi_p + \psi_m$, e a água move-se do maior para o menor potencial hidráulico.

Consideremos um tensiômetro com vacuômetro metálico (Figura 3), instalado em um perfil de solo com a cápsula porosa a profundidade z_2 da sua superfície e com distância z_1 entre esta superfície e o vacuômetro e que, em dado instante, fornece leitura LV . Considerando o plano de referência passando pelo vacuômetro, o potencial mátrico na profundidade z_2 , em energia por unidade de peso é calculado pela equação (6):

$$\psi_m = -LV + (z_1 + z_2) \quad (6)$$

sendo:

$\psi_g = -(z_1 + z_2)$ – potencial gravitacional, m;

$\psi_H = -LV$ – potencial hidráulico, m;

ψ_m – potencial mátrico da água no solo, na profundidade z , m;

LV – leitura observada no vacuômetro, m;

z_1 – altura do vacuômetro em relação à superfície do solo, m;

z_2 – profundidade de instalação da cápsula porosa, m.

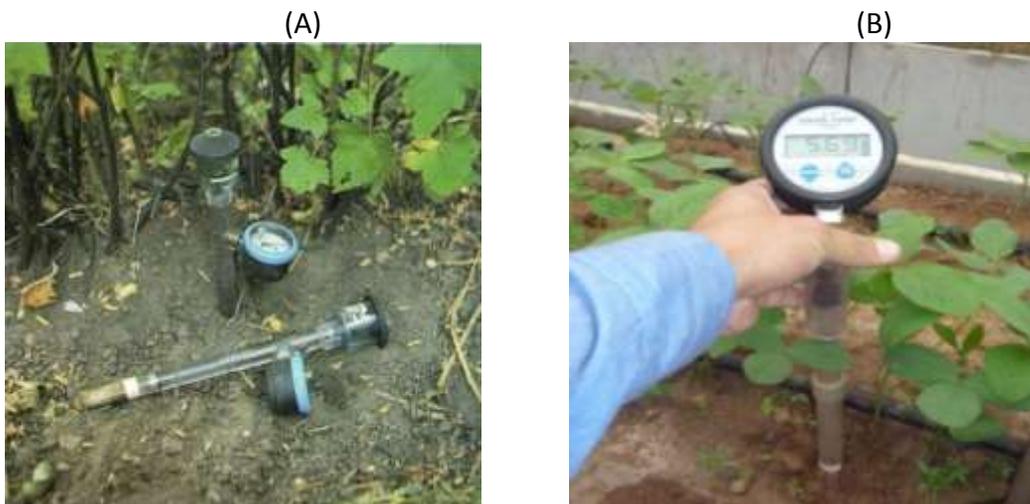


Figura 3 – Tensiômetros com vacuômetro analógico (A) e digital (B)

Exemplo 1 – Um tensiômetro está instalado a uma profundidade de 50 cm em relação à superfície do solo (z_1) e o vacuômetro está a 15 cm acima desta mesma superfície (z_2). Em dado momento a leitura observada no vacuômetro é 0,5 bar (LV). Qual o potencial mátrico a 50 cm de profundidade (ponto A)?

Solução:

$$\psi_H(A) = -LV = -50 \text{ cm}$$

$$\psi_g(A) = -(z_1 + z_2)$$

$$\psi_m(A) = -LV + (z_1 + z_2) = -516 + (15 + 50) = -451 \text{ cm} = -44 \text{ kPa}$$

Potencial osmótico: refere-se ao trabalho químico realizado ao levar a água do estado padrão (água pura) até o ponto em consideração (geralmente uma solução no solo ou na planta). O valor de ψ_o é idêntico ao da pressão osmótica da solução. No caso da água do solo é necessário extrair a solução do solo e medir sua concentração salina e estimar ψ_o (atm) aplicando-se a [equação \(7\)](#):

$$\psi_o = -RT C \quad (7)$$

em que:

ψ_o – potencial osmótico da solução do solo, atm;

$R = 0,0082 \text{ atm} \cdot \text{L mol}^{-1} \text{K}^{-1}$;

T – temperatura da solução, K (= °C + 273,15);

C – concentração salina da solução do solo, mol L⁻¹. Para solos não salinos pode-se considerar $C < 10^{-3}$ moles L⁻¹ e $\psi_o < 0,025$ atm (25 cm.c.a).

Curva característica de umidade do solo

Para um mesmo conteúdo de água os diferentes tipos de solo retêm a água com diferentes níveis de energia, existindo, portanto, diferentes relações teor de água-potencial mátrico. Esta relação se chama curva característica de umidade ou curva de retenção de água e depende da textura e da estrutura do solo porque estas afetam o tamanho e o número de poros. A relação entre ψ_m e θ é mostrada nas [Figuras 4](#) (variação da retenção de água em função da textura) e [5](#) (variação da retenção de água em função da estrutura).

Observando as [Figuras 4 e 5](#) verifica-se que:

(a) Solos bem estruturados tem maior porosidade e, quando saturados, contêm maior quantidade de água. As características mais notáveis da matriz do solo são: a natureza das partículas (textura) e a estruturação em agregados deformáveis não rígidos (estrutura). A frequência de poros é função da textura. Assim, os solos argilosos, por terem partículas

muito pequenas e numerosas, formam entre si grande volume de poros, mesmo que de tamanho muito pequeno, podendo reter grande quantidade de água. A estruturação do solo, especialmente solos de textura fina, tende a aumentar o tamanho dos poros grandes (macroporosidade). A textura domina a porosidade total (número de microporos) e a distribuição do tamanho de poros.

(b) Quando o potencial mátrico se aproxima de zero, o efeito da estrutura sobre o conteúdo de água é dominante sobre a textura e o contrário ocorre para valores mais negativos do ψ_m . Em geral, quanto mais argiloso é um solo, maior é o conteúdo de água a um determinado potencial, já que existe maior porosidade total, mas a água está mais fortemente unida à matriz do solo porque se trata de poros pequenos.

(c) A compactação reduz o tamanho dos poros e a porosidade total, aumentando a área superficial e a força com que o solo retém a água. Conforme um solo seca, a película da solução do solo reduz sua espessura, a importância relativa das forças capilares diminui e as forças de adsorção dominam os fenômenos hidrofísicos. Os primeiros poros que se esvaziam são os de tamanho grande.

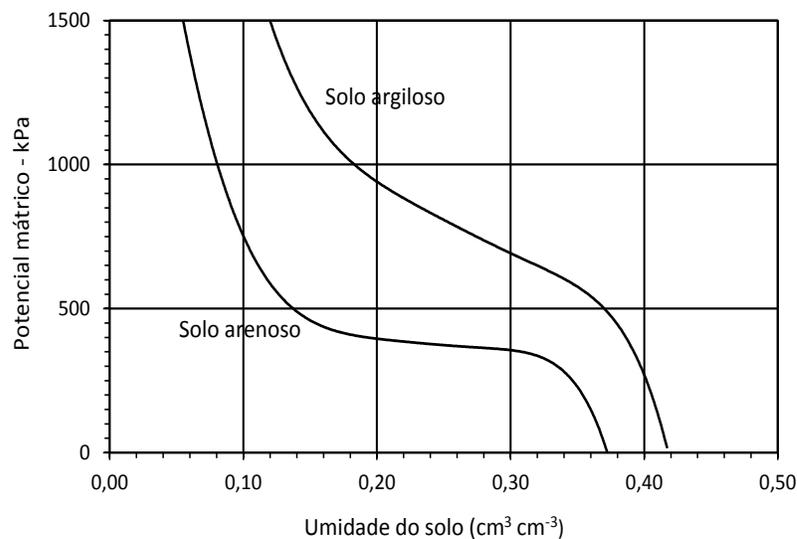


Figura 4 – Curvas características de umidade do solo: variação da retenção de água no solo em função da textura

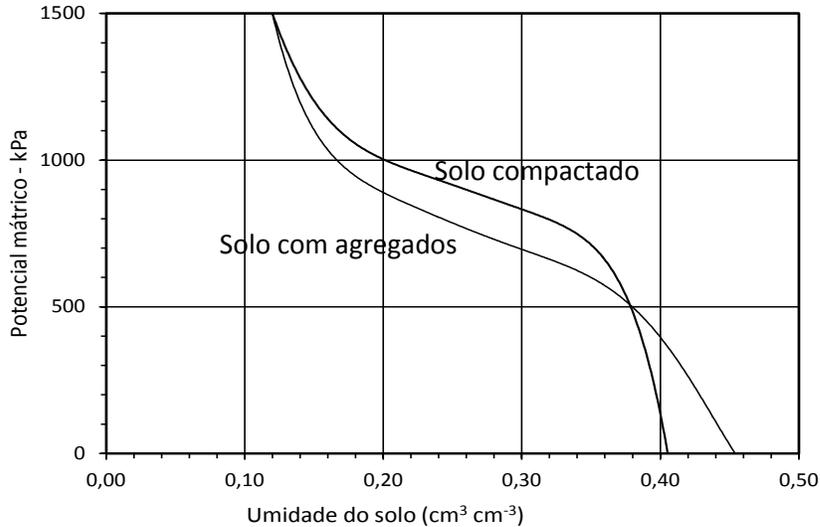


Figura 5 – Curvas características de umidade do solo: variação da retenção de água no solo em função da estrutura

RELAÇÕES MASSA VOLUME DOS CONSTITUINTES DO SOLO

Massa específica do solo – Densidade

Massa específica das partículas sólidas do solo - Razão entre a massa de solo seco (sólidos) e o volume ocupado pelas partículas sólidas (veja Figura 2):

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (g \text{ cm}^{-3}; kg \text{ m}^{-3}) \quad (8)$$

Já a densidade de partículas (d_p) possui o mesmo valor numérico da massa específica expressa em $g \text{ cm}^{-3}$, porém sem dimensão, pois é a relação entre a massa específica do solo e a massa específica da água. Para um solo com $\rho_p = 2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (2650 kg m^{-3}) tem-se $d_p = 2,65$.

Para os solos minerais comuns, a massa específica das partículas apresenta os seguintes valores médios:

Feldspato: $2,5$ a $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ (2500 a 2600 kg m^{-3})

Mica: $2,7$ a $3,0 \text{ g cm}^{-3}$ (2700 a 3000 kg m^{-3})

Quartzo: $2,5$ a $2,8 \text{ g cm}^{-3}$ (2500 a 2800 kg m^{-3})

Minerais de argila: $2,2$ a $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ (2200 a 2600 kg m^{-3})

Média = $2,48$ a $2,75 \text{ g cm}^{-3}$ (2480 a 2750 kg m^{-3}) $\rightarrow 2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (2650 kg m^{-3})

Para solo mineral médio, assume-se $d_p = 2,65$. Este valor aumenta quando o solo tem alta porcentagem de minerais (dióxido de manganês e dióxido de titânio) e diminui quando tem alto teor de matéria orgânica. Para matéria orgânica d_p varia de $1,3$ a $1,5$.

Massa específica global - Razão entre a massa de solo seco (sólidos) e o volume total, ou aparente, ocupado pela amostra de solo (sólidos + água + ar):

$$\rho_g = \frac{M_s}{V_t} \quad (g \text{ cm}^{-3}; kg \text{ m}^{-3}) \quad (9)$$

A massa específica global dos solos minerais naturais é muito variável: 0,7 a 2,0 g cm⁻³ ou 700 a 2000 kg m⁻³ (densidade global 0,7 a 2,0). Alguns valores médios, representativos para solo da camada superficial, são:

Solo arenoso: 1,55 a 1,80 g cm⁻³ (1550 a 1800 kg m⁻³)
 Solo franco arenoso: 1,40 a 1,60 g cm⁻³ (1400 a 1600 kg m⁻³)
 Solo franco: 1,35 a 1,60 g cm⁻³ (1350 a 1600 kg m⁻³)
 Solo franco argiloso: 1,30 a 1,40 g cm⁻³ (1300 a 1400 kg m⁻³)
 Solo argilo arenoso: 1,25 a 1,35 g cm⁻³ (1250 a 1350 kg m⁻³)
 Solo argiloso: 1,00 a 1,30 g cm⁻³ (1000 a 1300 kg m⁻³)
 Solos orgânicos: 0,20 a 0,60 g cm⁻³ (200 a 600 kg m⁻³)

Conhecendo-se a d_p dos horizontes de um perfil de solo é possível avaliar certas propriedades como drenagem, porosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e à água e capacidade de armazenamento de água. A densidade global do solo é indicativa do seu grau de compactação que está indiretamente relacionada à estrutura. A densidade global do solo e a porosidade total são as formas mais comuns de quantificar a compactação do solo. Como o solo é um material poroso, por compressão, a mesma massa de material sólido pode ocupar um volume menor. Isto afeta sua estrutura, o arranjo de poros, o volume de poros e as características de retenção de água.

Porosidade do solo

Porosidade total do solo - razão entre o volume total de poros (água + ar) e o volume total ocupado pela amostra de solo (sólidos + água + ar) [equação (10)]:

$$P_t = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_p}{V_t} \quad (cm^3 \text{ cm}^{-3}; m^3 \text{ m}^{-3}) \quad (10)$$

Por dificuldades em se obter diretamente o volume de poros em uma amostra de solo, estima-se P_t em função dos valores conhecidos de ρ_g e ρ_p , conforme equação (11):

$$P_t = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_p} = 1 - \frac{d_g}{d_p} \quad (11)$$

Porosidade livre de água – razão entre o volume de ar ($V_p - V_w$) e o volume ocupado pela amostra de solo (volume total):

$$P_r = \frac{V_a}{V_t} = \frac{V_p - V_w}{V_t} = P_t - \theta \quad (cm^3 cm^{-3}; m^3 m^{-3}) \quad (12)$$

sendo θ o conteúdo volumétrico de água no solo ($cm^3 cm^{-3}; m^3 m^{-3}$).

Conteúdo relativo de água no solo

Pode-se expressar o conteúdo relativo de água no solo em base de massa (umidade gravimétrica) e em base de volume (umidade volumétrica). A umidade à base de massa pode ser obtida por secagem de uma amostra de solo (umidade à base de massa seca) e por saturação de uma mostra de solo (umidade à base de massa úmida):

(a) À base de massa seca (massa de água por massa de solo seco):

$$U_s = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_t - M_s}{M_s} \quad (g g^{-1}; kg kg^{-1}) \quad (13)$$

(b) À base de massa úmida (massa de água por massa de solo úmido):

$$U_u = \frac{M_w}{M_t} = \frac{M_t - M_s}{M_t} \quad (g g^{-1}; kg kg^{-1}) \quad (14)$$

Neste caso a seguinte relação pode ser utilizada para se calcular o teor de água em base de massa de solo seco:

$$U_s = \frac{U_u}{1 - U_u} \quad (g g^{-1}; kg kg^{-1}) \quad (15)$$

(c) À base de volume (volume de água por volume de solo úmido):

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = U_s d_g \quad (cm^3 cm^{-3}; m^3 m^{-3}) \quad (16)$$

O grau de saturação de um solo é um índice que expressa o volume de água presente no volume total de poros:

$$\theta_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (cm^3 cm^{-3}; m^3 m^{-3}) \quad (17)$$

Quando o solo está completamente seco $\theta_r = 0$ e quando está totalmente saturado $\theta_r = 1 cm^3 cm^{-3}$. Contudo, a saturação completa raramente é atingida, uma vez que o ar

quase sempre está presente, podendo permanecer bloqueado dentro de poros do solo. Quando o grau de saturação é máximo, ao teor de água do solo denomina-se ponto de saturação. Neste ponto, o potencial mátrico é nulo. Na superfície de um solo, a saturação pode ocorrer temporariamente, após uma chuva ou irrigação. Abaixo do nível do lençol freático o solo é considerado saturado e ocorre pressão positiva.

Exemplo 2 – Uma amostra de solo de 1000 cm^3 tem peso úmido de 1460 g e seco de 1200 g. Sendo a 2,65 a densidade das partículas, calcular: (a) a umidade do solo à base de massa seca (b) a umidade do solo à base de volume; (c) a massa específica global do sol; (d) a porosidade total do solo; e (e) a porosidade livre de água.

Solução:

$$(a) U_s = \frac{M_w}{M_s} = \frac{1460 - 1200}{1200} = 0,217 \text{ g g}^{-1} \text{ (21,7 \%)}$$

$$(b) \theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{260}{1000} = 0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ (26 \%)}$$

$$(c) \rho_g = \frac{M_s}{V_t} = \frac{1200}{1000} = 1,2 \text{ g cm}^{-3}$$

$$(d) P_t = 1 - \frac{d_g}{d_p} = 1 - \frac{1,2}{2,65} = 0,547 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ (54,7 \%)}$$

$$(e) P_r = P - \theta = 0,547 - 0,26 = 0,287 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ (28,7 \%)}$$

Determinação do conteúdo de água no solo

Há diversos métodos para a determinação do conteúdo de água do solo. Estes métodos vêm evoluindo ao longo do tempo, adequando-se aos avanços da tecnologia. Para se obter detalhes sobre vários destes métodos pode-se consultar os textos escritos por [Carvalho e Oliveira \(2012\)](#) e [Andrade Júnior, Silva e Coelho \(2013\)](#). De uma forma geral, os métodos podem ser agrupados em duas categorias: métodos diretos (ou gravimétricos) e métodos indiretos. Entre os métodos diretos, também denominados gravimétricos, está o método de secagem em estufa de circulação forçada (padrão), o de secagem em forno micro-ondas e o das pesagens. Os métodos indiretos baseiam-se em medidas da resistência do solo à passagem de uma corrente elétrica, da constante dielétrica do solo, da tensão da água no solo e da moderação de neutros.

Método da secagem em estufa – este método é preciso e por isso é considerado padrão. Baseia-se na secagem de uma amostra de solo úmido, de massa conhecida, em uma estufa de circulação forçada, à temperatura de $105 - 110 \text{ }^\circ\text{C}$, até massa constante. Normalmente, uma amostra de solo nesse ambiente atinge massa constante após 24 h de secagem. O tempo não deve ultrapassar 36 h para evitar a queima da matéria orgânica do solo. A diferença entre a massa da amostra de solo úmido (M_t) e sua massa após a

secagem (M_s), corresponde à massa de água contida na amostra. Para o cálculo do conteúdo de água utiliza-se a [equação \(13\)](#). A desvantagem deste método para uso no manejo da irrigação é que não fornece resultado em tempo real, isto é, o teor de água do solo só será conhecido, pelo menos, 24 h após a amostragem deste solo.

O material necessário às determinações é o seguinte: cápsulas de alumínio com capacidade para 50 a 200 g de solo; estufa de circulação forçada; balança com resolução de aproximadamente 0,01 g e trado amostrador. Alguns cuidados devem ser tomados na determinação da umidade pelo método da estufa, como: fechar as cápsulas de alumínio quando estas receberem as amostras de solo no campo e somente abri-las após a obtenção da massa do solo úmido; obter a tara das cápsulas de alumínio com as respectivas tampas; retirar as amostras de solo utilizando-se trado ou outro instrumento similar, cuidando-se para não misturar as amostras dos diferentes horizontes do solo durante a amostragem.

Método da secagem em forno micro-ondas – para se reduzir o tempo de secagem, têm sido propostas diferentes alternativas ao emprego da estufa, sendo uma delas a utilização do forno micro-ondas. O tempo de secagem depende do número de amostras, da massa da amostra, do tipo de solo, do teor de água no solo, do tamanho e da potência do forno. O tempo de secagem aumenta com o teor de água inicial da amostra de solo. [Tavares et al. \(2008\)](#) estudaram a utilização do forno de micro-ondas na determinação da umidade no solo, comparando-se os resultados com os valores fornecidos pelo método da estufa convencional, usando-se nove tipos solos, com diferentes texturas. Concluíram que o teor de água no solo pode ser estimado de forma rápida, a partir dos valores de umidade obtidos no forno de micro-ondas. O tempo de secagem de 240 segundos foi suficiente para a estabilização da massa em todos os solos estudados. O processo de secagem no forno de micro-ondas tem maior efeito sobre solos argilosos em relação àqueles arenosos. [Miranda et al. \(2012\)](#) relatam que o tempo de 5 minutos de secagem de uma amostra de solo franco siltoso em forno de micro-ondas pode ser usado com precisão compatível ao da determinação da umidade em estufa de circulação forçada.

Exemplo 3 - Suponha que uma amostra de solo de 142 g foi retirada de um solo na profundidade de 20 cm e, após seca em estufa, apresentou massa de 110 g. Calcule o teor de água do solo expressa na base de massa seca e na base de volume considerando que a densidade global do solo é 1,28.

Solução:

O teor de água em base de massa seca é $U_s = (142 - 110)/11 = 0,291$ g/g (29,1 % = 29,1 g de água em 100 g de solo seco). Isso significa que, com esse teor gravimétrico de água, uma amostra de 129,1 g de solo úmido contém 29,1 g de água. O teor volumétrico de água é $\theta = 0,291 \times 1,28 = 0,373$ cm³ cm⁻³ (37,3 %).

Método das pesagens – este é também um método gravimétrico direto para a determinação da umidade do solo, com a vantagem de fornecer o resultado tão logo a

amostra de solo seja retirada na área de interesse. Ao contrário do método da estufa, baseia-se na saturação da amostra de solo para se obter uma massa padrão (M_p) que servirá de referência para as demais determinações. Por este método determina-se, de princípio, o teor de água do solo à base de massa de solo úmido. O método consiste em: colocar água até aproximadamente a metade de um balão volumétrico de 500 ml; adicionar 100 g de terra seca à estufa neste balão volumétrico; agitar o conjunto por algum tempo para eliminar o ar do solo e facilitar a entrada de água nos interstícios do mesmo; completar com água o volume de 500 ml do balão volumétrico; obter a massa do conjunto para se ter a massa padrão M_p . Para se determinar o teor de água no solo em um instante qualquer, repete-se toda a operação anterior utilizando 100 g de solo úmido, proveniente da área de interesse, obtendo-se massa M . O teor de água do solo, expresso na base de massa úmida, será calculado pela equação (18) e, na base de massa seca, pela equação (19):

$$U_u = (M_p - M) \frac{d_p}{d_p - 1} \quad (g \text{ de água por } 100g \text{ de solo úmido}) \quad (18)$$

$$U_s = \frac{U_u}{100 - U_u} \quad (g \text{ de água por } g \text{ de solo seco}) \quad (19)$$

Exemplo 4 – Um agricultor controla a irrigação utilizando o método das pesagens para a determinação do teor de água no solo. Para isso obteve a massa padrão de 787,50 g para uma determinada gleba. Num certo dia, utilizando-se o mesmo balão volumétrico utilizado para obter a massa padrão, determinou a massa de 773,16 g com solo na umidade atual. Conhecendo-se a densidade das partículas do solo $d_p = 2,65$ e a densidade global $d_g = 1,20$, calcular o teor de água do solo à base de massa de solo seco e à base de volume.

Solução:

$$U_u = (787,5 - 773,16) \frac{2,65}{2,65 - 1} = 23,03 \% \text{ (a base de massa úmida)}$$

$$U_s = \frac{23,03}{100 - 23,03} = 0,299 \text{ g g}^{-1} \text{ (29,9 \% em massa seca)}$$

$$\theta = 0,299 \times 1,2 = 0,359 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ (35,9 \% em volume)}$$

A questão do número de amostras necessário para a determinação da umidade do solo é uma pergunta muito comum, porém difícil de ser respondida. Ao se coletar amostras de solo, a variabilidade dos resultados das determinações deve-se a erros de metodologia na amostragem e à heterogeneidade do solo em profundidade e horizontalmente. É difícil separar esses dois fatores, mas se a amostragem for feita cuidadosamente, a principal fonte de variação é a heterogeneidade do solo. Portanto, quanto mais heterogêneo for o solo, maior número de amostras é necessário. Contudo,

isso é muito subjetivo. Para áreas homogêneas, um critério, mesmo que ainda subjetivo, é coletar de 3 a 6 amostras na mesma profundidade em pontos diferentes da área. O importante é que o operador esteja ciente da variabilidade dos resultados e que, se esse número de amostras ainda apresentar grande variação, o tamanho deve ser aumentado.

Outro aspecto da amostragem é a escolha das profundidades. Este critério depende da profundidade efetiva do sistema radicular. Para uma cultura cuja profundidade efetiva das raízes seja, por exemplo, 30 cm duas amostragens seriam suficientes: uma de 0 – 15 cm e outra de 15 – 30 cm dariam boa ideia da distribuição de água no perfil do solo. Para culturas de porte maior, exigindo amostragens até 100 cm de profundidade, por exemplo, seria recomendável amostrar de 20 em 20 cm. Não se deve esquecer, porém, que em muitos casos a zona mais crítica é a superficial (0 – 30 cm) e esta deve ser bem amostrada.

Quanto ao local de amostragem, para culturas plantadas em linha, a umidade do solo na linha, onde está a maioria do sistema radicular, é menor que nas entre linhas. Nesse caso, devem-se fazer amostragens em ambas as posições, a fim de se obterem valores médios representativos.

Método tensiométrico – Este é um método indireto que utiliza o tensiômetro para determinar o potencial mátrico da água no solo, possibilitando a determinação indireta do teor de água utilizando-se a curva de retenção de água do solo. Os tensiômetros são aparelhos constituídos basicamente de um tubo de PVC, cheio com água, contendo uma cápsula porosa em uma das extremidades e um vacuômetro (analógico fixo ou digital portátil) em outra extremidade (Figura 3). O tubo com a cápsula porosa é inserido no solo à profundidade desejada e o vacuômetro a certa altura da superfície do solo. Para determinar o potencial mátrico na profundidade de instalação da cápsula porosa utiliza-se a equação (6). Para estabelecer a correspondência entre o potencial mátrico e o teor de água no solo é necessário utilizar a curva de retenção de água do solo, obtida em condições de campo para o tensiômetro considerado. É importante observar que um tensiômetro opera adequadamente em uma amplitude de potencial mátrico de aproximadamente 0 a -80 kPa, além do qual pode romper o contato da água do solo com a água na cápsula do tensiômetro e ocorrer a formação de bolhas de ar no seu interior.

O potencial da água dentro do tensiômetro é similar àquele da água pura e livre. Se o solo está saturado, haverá equilíbrio entre a água dentro do tensiômetro e a água do solo e o vacuômetro fornecerá uma leitura igual à zero. Se o solo não está saturado a água tenderá a se movimentar do tensiômetro para o solo, indicando que o potencial da água dentro do tensiômetro é maior que o potencial da água no solo. Nestas condições o vacuômetro indicará uma subpressão que é a medida direta do potencial hidráulico da água no solo.

Deve-se entender por estação de tensiômetros ao conjunto de aparelhos instalados em um mesmo local em diferentes profundidades. Deve-se ter pelo menos uma ou, preferencialmente, duas estações em cada gleba de terreno que seja diferente em tipo e profundidade de solo. As estações devem estar localizadas em solo representativo da respectiva gleba, evitando-se depressões ou elevações do terreno e em locais que não interferem com os trabalhos de campo.

Para a maioria das culturas e dos solos, recomendam-se duas profundidades de instalação em cada estação. Um tensiômetro deve estar instalado à 1/4 da profundidade efetiva do sistema radicular, pelo qual se determina o momento de irrigar. O outro a 3/4 da mesma, sendo este é utilizado para controlar a lâmina de irrigação juntamente com o primeiro.

Para se preparar o tensiômetro para instalação deve-se saturar a cápsula por 24 h e, ao final, certificar-se da ausência de ar na cápsula, no corpo do aparelho e no vacuômetro. Para extrair o ar remanescente pode-se utilizar uma bomba de vácuo manual e para certificar-se da ausência de ar pode-se expor o tensiômetro ao sol e, quando o vacuômetro marcar uma determinada leitura, envolver a cápsula com um plástico. Se a leitura permanecer constante significa que não existe ar no aparelho. Além disso, alguns cuidados devem ser tomados na instalação. Deve-se inserir a cápsula dentro de um furo preparado com um trado, de forma que a parede externa da cápsula porosa permaneça em íntimo contato com o solo na zona radicular das culturas. O furo de trado deve ser feito a uma profundidade um pouco maior que aquela que se deseja medir o potencial mátrico. Em seguida, coloca-se terra solta dentro do furo até o limite da profundidade de instalação e adicione água. O aparelho é instalado pressionando-o levemente contra o furo. Em seguida coloca-se terra ao redor do aparelho, compactando-a ligeiramente para evitar o acúmulo e a infiltração de água nessa região. As estações de tensiômetros devem ser protegidas do sol e de possíveis acidentes em campo.

Para garantir o funcionamento adequado por longo tempo é necessário fazer manutenções periódicas dos aparelhos, que consistem em completá-lo com água fervida ou destilada e retirar o ar com bomba manual de vácuo, sempre que se verificar abaixamento da coluna de água dentro do tensiômetro. Interpretações gerais das leituras são: potenciais superiores a - 10 kPa indicam solo saturado; entre - 10 e - 30 kPa indicam umidades próximas à capacidade de campo; de - 30 a - 75 kPa indicam o momento da irrigação para a maioria das culturas e próximas a - 80 kPa indicam baixo teor de água no solo. Valores críticos para a irrigação de diversas culturas podem ser obtidos na literatura especializada.

Métodos eletrométricos – Estes métodos utilizam blocos de resistência elétrica e se baseiam na variação da resistência elétrica entre um par de eletrodos inserido em blocos construídos de materiais capazes de absorver água como, argila, fibra de vidro, gesso, nylon, etc. Os blocos quando enterrados absorvem ou perdem água para entrar em equilíbrio com umidade do solo. A resistência elétrica entre os eletrodos varia em razão inversa da umidade do bloco. Os blocos de fibra de vidro foram desenvolvidos por [Coleman e Hendrix \(1949\)](#). Os de gesso por [Bouyoucos e Mick \(1940\)](#) que propõem que as leituras de resistência nos blocos de gesso devam ser interpretadas em termos da água disponível no solo para as plantas e que em todos os solos a porcentagem de água disponível é aproximadamente a mesma para um dado valor de resistência. A rigor, a resistência elétrica do solo depende também da textura e da concentração de sais solúveis. O gesso mantém uma concentração eletrolítica constante correspondente a uma solução saturada de sulfato de cálcio que funciona como um *buffer* resistindo a pequenas

variações de salinidade do solo. O que não acontece com materiais inertes como a fibra de vidro que são altamente sensíveis a variações da salinidade do solo.

Os blocos de gesso, mesmo cobertos por resinas, tem durabilidade baixa, pois, são solúveis. Por isso, estes blocos oferecem pequena precisão principalmente a potenciais matriciais superiores a -100 kPa. Porém com grande vantagem em medições continuadas em campo. Outro fator que influencia a condutibilidade elétrica no bloco de gesso é a sua temperatura, o que foi considerado por [Lima \(1997\)](#) quando caracterizou um sensor que pode ser utilizado interligado a um sistema de determinação do teor de água disponível no solo. Este sensor foi construído em bloco de gesso, onde foram inseridos dois eletrodos de metal e um sensor de temperatura. Para análise dos resultados foi estabelecida a relação entre a resistência elétrica entre os eletrodos, normalizada para 25 °C, e a umidade absorvida pelo bloco de gesso e a relação dessa resistência elétrica com os potenciais matriciais na faixa de água disponível entre a capacidade de campo (33 kPa) e o ponto de murchamento (1500 kPa), para solos franco, franco-arenoso e areia. [Lima \(1997\)](#) observou que em todos os solos a porcentagem de água disponível no solo é aproximadamente a mesma para um dado valor de resistência elétrica, confirmando a afirmativa de [Bouyoucos e Mick \(1940\)](#) de que as leituras de resistências devam ser interpretadas em termos de água disponível no solo. Outra observação é que a faixa de água disponível para as plantas está contida na faixa de umidade absorvida pelo sensor.

Os blocos de gesso têm vida útil entre três a cinco anos de utilização em condições de solos irrigados, são de fácil construção e manejo, podem ser utilizados em toda a faixa de água disponível no solo para as plantas, oferecem condições de medições continuadas em campo e podem ter suas informações tratadas através de um sistema automatizado de medição.

Método da reflectometria no domínio do tempo (TDR) - Este método, conhecido pela sigla TDR, baseia-se no tempo de reflexão de pulsos elétricos propagados ao longo de uma sonda introduzida no solo. O princípio de medida da umidade do solo pela técnica da TDR foi primeiramente introduzida por [Davis e Chudobiak \(1975\)](#) e implementado e validado por [Topp, Davis e Annan \(1980\)](#). A sonda, composta por duas hastes paralelas, atua como um guia de onda com o pulso elétrico se propagando no solo como uma onda plana. As hastes atuam como condutores e o solo como meio dielétrico. As constantes de propagação de ondas eletromagnéticas no solo dependem das propriedades deste, como umidade e condutividade elétrica.

As propriedades dielétricas do solo são influenciadas por sua umidade. Justamente pelo fato da constante dielétrica da água ($80,4$ a temperatura 293 K) ser muito maior que a do ar ($1,0$ a temperatura 293 K) e dos constituintes minerais do solo (entre $3,0$ e $7,0$ a temperatura 293 K), a velocidade de propagação de uma onda de energia em hastes paralelas inseridas no solo é dependente do seu teor de água, possibilitando a monitoração da umidade do solo através das medidas de suas propriedades dielétricas. A técnica TDR determina a constante dielétrica do solo através da medição do tempo de propagação da onda eletromagnética no solo. O funcionamento da TDR para a determinação da umidade baseia-se na medida da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em uma guia de onda metálica (sonda) inserida no solo. A relação entre

a velocidade de propagação da onda no meio e a sua constante dielétrica aparente pode ser expressa de forma aproximada pela [equação \(20\)](#):

$$v = \frac{c}{\varepsilon^{0,5}} \quad (20)$$

sendo v a velocidade de propagação da onda eletromagnética, m s^{-1} ; c a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo ($2,99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$); ε a constante dielétrica aparente do meio ($\text{s}^2 \text{ m}^{-2}$).

O equipamento TDR mede o tempo de trânsito (t) das ondas eletromagnéticas na sonda, o qual é dependente da constante dielétrica do solo (ε) [[equação \(21\)](#)]:

$$t = \frac{L \varepsilon^{0,5}}{c} \quad (21)$$

onde L (m) é o comprimento da sonda. A constante dielétrica medida para um solo é uma média ponderada das constantes dielétricas das frações dos componentes do solo, ou seja, das fases sólida, líquida e gasosa. Como a constante dielétrica da água é muito diferente do ar e do material sólido do solo (mineral e orgânico), uma pequena variação na umidade volumétrica do solo causará uma mudança considerável da constante dielétrica. A constante dielétrica pode ser calculada pela [equação \(22\)](#):

$$\varepsilon = \left(\frac{t c}{L} \right)^2 \quad (22)$$

Através de uma correlação experimental entre a constante dielétrica medida com o TDR e a umidade volumétrica do solo medida por gravimetria, pode-se, portanto, utilizar a técnica de TDR para a determinação da umidade do solo. A umidade volumétrica (θ) embora função do tipo de solo, densidade, temperatura e conteúdo de sal, é função da constante dielétrica (ε). Assim, um primeiro modelo de calibração empírico que relaciona ε e θ foi proposto por [Topp, Davis e Annan \(1980\)](#) [[equação \(23\)](#)]:

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,9 \times 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (23)$$

Esta relação possui uma precisão de $\pm 0,01$. Entretanto, recomenda-se que seja realizada uma calibração local a fim de obter, com maior confiabilidade, valores de umidade do solo para manejo da irrigação ([ANDRADE JÚNIOR; SILVA; COELHO, 2013](#)). A [equação \(23\)](#) tem sido aplicada mostrando-se adequada para a determinação da umidade. Entretanto, tem-se verificado limitações quando utilizada para medição da umidade com TDR em solos com alto teor de matéria orgânica, solos expansivos, solos salinos e contendo minerais magnéticos, como a magnetita.

A técnica da reflectometria no domínio do tempo tem sido mundialmente utilizada para a determinação da umidade e condutividade elétrica dos solos, em substituição às técnicas de moderação de nêutrons e gravimétricas. As principais vantagens da TDR são a

não utilização de radiação ionizante, a possibilidade de automação das análises, a multiplexação de diversas sondas num único equipamento e a pouca influência da textura e da densidade do solo na determinação da umidade. Os solos altamente intemperizados, com presença de altos teores de óxido de ferro e minerais magnéticos e baixos teores de matéria orgânica podem influenciar na resposta da TDR.

Método da bomba de nêutrons – Os métodos de determinação do teor de água do solo através da energia nuclear são utilizados desde a década de 50. Baseiam-se na interação entre o teor de água no solo e a radiação de nêutrons ou raios gama. A atenuação do fluxo de raios gama monoenergéticos passando por uma coluna de solo, depende do peso específico aparente do solo; logo, este fluxo sofre variação com o teor de água do solo.

Estes métodos podem ser classificados em dois tipos: de atenuação e de dissipação das partículas. O método de atenuação baseia-se na atenuação do fluxo de radiação quando passa pelo solo, sendo necessário colocar dois tubos no solo, um para emitir os raios e outro para absorção. Por requerer um fluxo elevado de partículas esse método é mais adequado para o uso em laboratórios. Possui excelente precisão para amostras pequenas.

O método de dissipação das partículas considera o retorno da radiação dissipada na vizinhança na própria fonte que emitiu a radiação, bastando então um só tubo para acesso. Seu princípio consiste em determinar o poder dissipador do sistema solo-água. Existe uma estreita relação entre este poder e o teor de água no solo, pois depende diretamente da quantidade de átomos de hidrogênio, que têm a habilidade de moderar eficientemente a energia cinética dos nêutrons rápidos por possuírem a mesma massa que estes, o que proporciona choques elásticos. Logo, os nêutrons emitidos por uma fonte são eficientemente moderados pela água do solo nas vizinhanças da fonte. Este método, também chamado bomba de nêutrons, é de uso mais comum nas condições do campo.

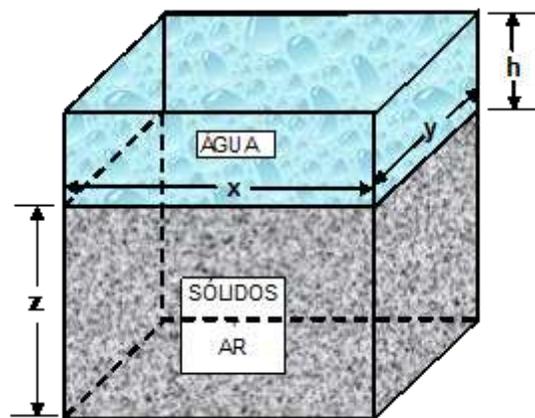
A bomba de nêutrons consiste de dois principais componentes: uma sonda e um contador. A sonda possui uma fonte de nêutrons rápidos e um detector para o fluxo de nêutrons lentos espalhados pelo solo. A sonda é introduzida num tubo de polietileno ou alumínio previamente colocado no solo. Os nêutrons lentos incidem sobre o detector, composto por um cristal cintilador, originando um fóton luminoso que excita uma célula fotomultiplicadora dando um impulso elétrico que se pode registrar no contador.

Os métodos que usam radiação possibilitam medidas em diferentes profundidades do solo, sendo que para medições muito próximas a superfície do solo, devido à esfera de influência da sonda, não oferece precisão. Estes métodos têm a vantagem na rapidez das medidas, cerca de um minuto, e podem ser repetidas várias vezes sem alterar a estrutura do solo. Como desvantagens são o elevado custo dos equipamentos e erros nos resultados para solos ricos em outras fontes de hidrogênio que não a água (matéria orgânica e outros elementos como cloro, ferro e boro). Não permitem um monitoramento contínuo. O uso destes medidores deve ser feito somente por pessoas treinadas em radioproteção.

ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO

Altura de água

É de interesse para irrigação expressar a quantidade de água existente no solo, em determinado momento, em termos de altura equivalente (lâmina de água). Para isso considera-se o solo como um reservatório de água. Para se calcular a lâmina de água h armazenada no solo em dado momento consideremos o volume de solo esquematizado na [Figura 6](#) com dimensões (x, y, z) e que toda água existente neste volume possa ser extraída e colocada sobre a face superior resultando altura de água h .



[Figura 6](#) – Lâmina de água contida em um volume de solo.

No caso esquematizado na [Figura 6](#) tem-se um volume de água $V_w = x y h$ podendo-se escrever:

$$h = \frac{V_w}{x y} \quad (\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}; \text{m}^3 \text{m}^{-2}; \text{cm}; \text{m}) \quad (24)$$

Pelos conceitos anteriores pode-se também escrever:

$$\theta = \frac{V_w}{x y z} = \frac{x y h}{x y z} = \frac{h}{z} \quad (25)$$

Para um solo com perfil de umidade homogêneo de profundidade z , resulta

$$h = \theta z \quad (\text{cm ou m de altura de água}) \quad (26)$$

Para um solo com perfil de umidade heterogêneo, contendo n camadas com espessura Δz_i (cm; m), a lâmina de água armazenada no solo (h , cm ou m) será:

$$h = \sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i \Delta z_i \quad (27)$$

sendo $\bar{\theta}_i$ o conteúdo médio de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de espessura Δz_i .

A variação do armazenamento de água no solo (Δh , cm ou m) para a profundidade de interesse z (cm ou m), em um intervalo de tempo Δt , pode ser calculada conhecendo-se a umidade média do perfil de solo em dois instantes, 1 e 2, da seguinte forma:

(a) Para um perfil de umidade homogêneo:

$$\Delta h = z (\theta_1 - \theta_2) \quad (28)$$

(b) Para um perfil de umidade não homogêneo:

$$\Delta h = \sum_{i=1}^n (\bar{\theta}_{1,i} - \bar{\theta}_{2,i}) \Delta z \quad (29)$$

Exemplo 5 – Um solo tem 35 % de teor volumétrico de água até a profundidade de 30 cm. Qual a lâmina de água armazenada e o volume por hectare?

Solução:

$$h = 0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \times 30 \text{ cm} = 10,5 \text{ cm} = 105 \text{ mm} = 1050 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$$

Exemplo 6 – Um solo com $d_g = 1,3$ tem 22 % de umidade gravimétrica até a profundidade de 30 cm. Qual a lâmina de água armazenada e o volume por hectare?

Solução:

$$\theta = 0,22 \times 1,3 = 0,286 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$h = 0,286 \times 30 = 8,58 \text{ cm} = 85,8 \text{ mm} = 858 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$$

Exemplo 7 – calcular as lâminas de água armazenadas em cada camada do solo e a variação de armazenamento entre os dias 28/05 e 31/05 até a profundidade de 60 cm utilizando os valores de umidades abaixo.

Profundidade (cm)	Teor de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		Armazenamento (mm) – h		Δh (mm)
	28/05	31/05	20/05	31/05	
0 – 15	0,331	0,295	49,7	44,3	5,4
15 – 30	0,368	0,351	55,2	52,7	2,5
30 – 45	0,410	0,393	61,5	59,0	2,5
45 – 60	0,484	0,474	72,6	71,1	1,5
Total			239	227,1	11,9

Solução:

Utilizando os teores de água nas datas consideradas, foram calculados os armazenamentos em cada camada [equação (29)] e a variação de armazenamento [equação (30)]. Observa-se que em 3 dias a variação de armazenamento no perfil do solo de 60 cm de profundidade foi 11,9 mm, correspondendo, em média, 3,97 mm d⁻¹.

Disponibilidade de água do solo para as plantas

Diz-se que a água do solo está disponível para as plantas toda vez que o fluxo de água do solo para a raiz é de uma intensidade tal que supre a demanda de água da planta e da atmosfera. A planta entra em déficit de água ou murcha quando o fluxo deixa de suprir essa demanda. Entretanto, por dificuldades de aplicação deste conceito dinâmico, para fins práticos de projeto e manejo da irrigação é comum aceitar o conceito clássico de água no solo que o considera como um reservatório de água. Experiências nas décadas de 30 e 40, do século passado, possibilitaram formar o seguinte conceito: água disponível é a quantidade de água armazenada no solo entre os potenciais mátricos de - 30 kPa (capacidade de campo, *CC*) e - 1500 kPa (ponto de murcha permanente, *PMP*).

Salvo algumas exceções, a maioria das plantas cultivadas entra em murcha permanente quando o potencial mátrico da água no solo atinge - 1000 a - 2000 kPa. O potencial - 1500 kPa representa um valor médio representativo. Para o *PMP*, a variação de umidade do solo nesta faixa de potencial é pequena e tem pouca influência no cálculo da água disponível.

Já os potenciais da água na capacidade de campo são mais importantes porque, para o solo úmido, pequenas variações de potencial podem representar grandes variações na quantidade de água armazenada. A umidade do solo definida como *CC* ao potencial de - 30 kPa pode ser representativa para um solo de textura argilosa, mas para um solo de textura média este valor possivelmente esteja mais próximo de - 10 kPa e para solo arenoso de - 8 kPa.

Definições para *CC* e *PMP*, são as seguintes:

Capacidade de Campo (*CC*) é o teor de água no solo depois que o excesso de água gravitacional tenha drenado e a taxa de movimento descente tenha sensivelmente diminuído. Como a drenagem do solo se dá de cima para baixo, a distribuição de umidade no perfil de um solo homogêneo é tal que ela aumenta em profundidade. Desta distribuição resulta um gradiente de potencial mátrico ($\text{grad } \psi_m$) contrário ao $\text{grad } \psi_g$. É de se esperar que, com o passar do tempo o $\text{grad } \psi_m$ aumenta até que, em dada condição de umidade do solo ele se iguale ao $\text{grad } \psi_g$. Nesta condição cessa a drenagem no perfil e a água do solo entra em equilíbrio, atingindo, assim, a capacidade de campo.

O teor de água na *CC* pode ser determinado indiretamente em laboratório, utilizando-se a curva de retenção de água do solo (Figura 7) ou em campo. A melhor forma de se determinar a *CC* de um solo é inundando uma área de 4 a 25 m² até uma profundidade de 1,5 vezes a da camada de interesse para o cálculo de *CC*. Terminada a

inundação, a área é coberta com lona plástica ou restos vegetais (palha) para prevenir perdas por evaporação na superfície. A partir daí, espera-se o equilíbrio ($\text{grad } \psi_m = \text{grad } \psi_g$) que, na prática, se dá depois de 24 a 72 horas para solos arenosos, e de 72 a 120 horas para solos argilosos. Retiram-se, então, amostras de solo para a determinação do teor de água do solo na camada de $0 - L$ que corresponderá à umidade na CC . A amostragem deverá ser feita de preferência em três pontos distantes de, aproximadamente, 1 m entre si e em várias profundidades. Na Figura 8 apresentam-se curvas de variação da umidade do solo com o tempo, utilizadas para determinar a capacidade de campo. Observa-se que para o solo arenoso o ponto que representa a CC é nítido, enquanto para o solo franco arenoso este ponto já não é bem definido. Para um solo argiloso a determinação desse ponto é bastante difícil.

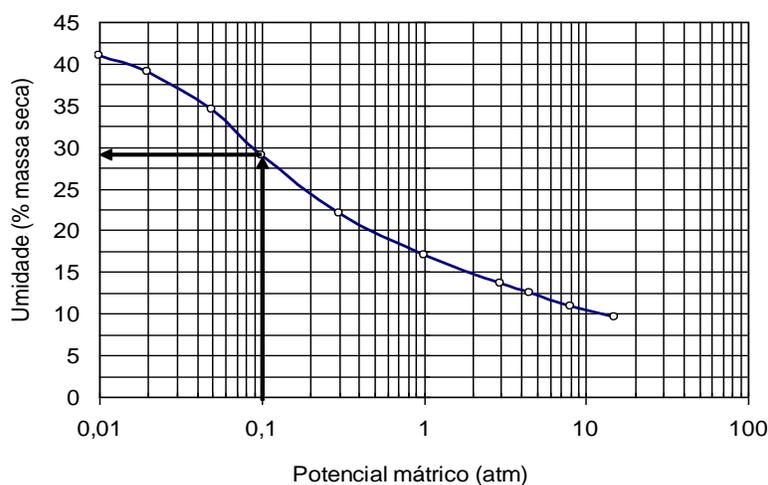


Figura 7 – Curva característica de retenção de água em um solo franco, mostrando o ponto correspondente à capacidade de campo.

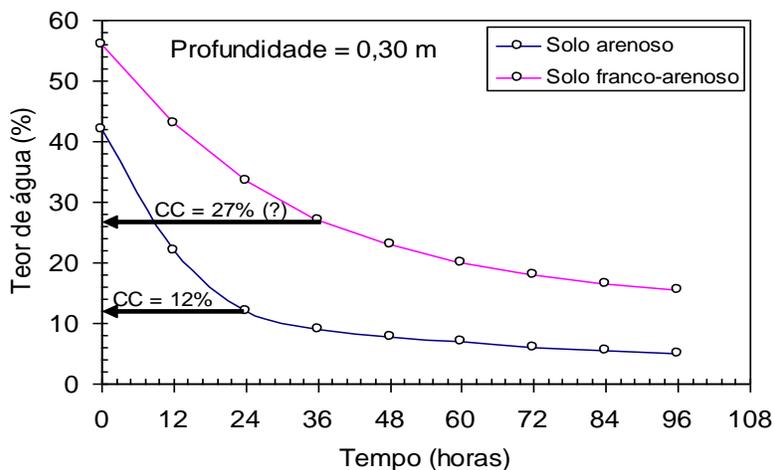


Figura 8 – Curvas de variação do teor de água em função do tempo para solos de duas classes texturais e os pontos correspondente à capacidade de campo.

Ponto de Murcha Permanente (PMP) é o teor de água no solo abaixo do qual uma planta em crescimento ativo apresenta perda de turgescência das folhas da qual não se recupera mesmo quando colocada em ambiente escuro com atmosfera saturada. Embora o PMP possa variar com as diferentes espécies de plantas, estágio de desenvolvimento, tipo de solo e condições climáticas, aceita-se como a umidade do solo à tensão de -1500 kPa, independentemente da espécie e condições ambientais e, portanto, estimado indiretamente em laboratório. É comum utilizar o girassol ou o feijoeiro como plantas indicadoras na determinação direta do PMP.

Disponibilidade total de água no solo (DTA) – de acordo com as equações (28) e (29), que representam a variação de armazenamento de água no solo, o cálculo da disponibilidade total de água no solo, expressa para uma profundidade unitária (por exemplo, 1 cm ou 1m) é feito desde que se conheçam os valores de CC , PMP e d_g . O cálculo de DTA em mm de água por cm de profundidade de solo é feito pela equação (30) quando U_{CC} (umidade do solo na capacidade de campo em base de massa seca) e U_{PMP} (umidade do solo no ponto de murcha permanente em base de massa seca) são expressos em $g\ g^{-1}$. Quando U_{CC} e U_{PMP} são expressos em $kg\ kg^{-1}$ o cálculo de DTA ($mm\ m^{-1}$) é feito pela equação (31). Quando as umidades na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) são expressas à base de volume ($cm^3\ cm^{-3}$; $m^3\ m^{-3}$) utilizam-se as equações (32) e (33) respectivamente. Na Tabela 1 são apresentados valores orientativos para umidades de saturação de solos, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e disponibilidade total de água, que podem ser utilizados na ausência de informações locais.

$$DTA\ (mm\ cm^{-1}) = 10\ (U_{CC} - U_{PMP})\ d_g \quad \text{para } z = 1\ \text{cm} \quad (30)$$

$$DTA\ (mm\ m^{-1}) = 1000\ (U_{CC} - U_{PMP})\ d_g \quad \text{para } z = 1\ \text{m} \quad (31)$$

$$DTA\ (mm\ cm^{-1}) = 10\ (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad \text{para } z = 1\ \text{cm} \quad (32)$$

$$DTA\ (mm\ m^{-1}) = 1000\ (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad \text{para } z = 1\ \text{m} \quad (33)$$

Tabela 1 – Valores orientativos dos conteúdos de água do solo na saturação (θ_{sat}), na capacidade de campo (θ_{CC}), no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e disponibilidade total de água (DTA). Fonte: Pereira et al. (2010).

Textura do solo	Conteúdos de água			DTA mm m^{-1}
	θ_{sat} ($m^3\ m^{-3}$)	θ_{CC} ($m^3\ m^{-3}$)	θ_{PMP} ($m^3\ m^{-3}$)	
Arenoso	0,32 – 0,42	0,10 – 0,15	0,03 – 0,06	60 – 70
Areia franca	0,32 – 0,47	0,12 – 0,19	0,05 – 0,10	70 – 90
Franco arenoso	0,34 – 0,51	0,17 – 0,26	0,06 – 0,13	110 – 130
Franco	0,42 – 0,51	0,22 – 0,31	0,09 – 0,16	130 – 150
Franco siltoso	0,42 – 0,55	0,23 – 0,34	0,08 – 0,15	150 – 190
Siltoso	0,42 – 0,55	0,30 – 0,33	0,10 – 0,11	200 – 220
Franco argilo siltoso	0,40 – 0,49	0,20 – 0,30	0,12 – 0,18	80 – 120

Franco argiloso	0,47 – 0,51	0,28 – 0,38	0,16 – 0,22	120 – 160
Franco argilo arenoso	0,49 – 0,53	0,32 – 0,40	0,16 – 0,22	160 – 180
Argilo arenoso	0,47 – 0,53	0,28 – 0,40	0,19 – 0,30	90 – 100
Argilo siltoso	0,49 – 0,55	0,38 – 0,50	0,23 – 0,34	150 – 160
Argiloso	0,51 – 0,58	0,40 – 0,55	0,30 – 0,42	100 – 130

Capacidade de água disponível (CAD) – a CAD é a quantidade total de água disponível que o solo pode armazenar em uma profundidade z que corresponde à profundidade efetiva do sistema radicular (camada de solo onde se concentram cerca de 80% do total de raízes finas ou absorventes). Portanto, a CAD representa o intervalo de umidade disponível. O cálculo da CAD é feito pela [equação \(34\)](#):

$$CAD (mm) = DTA \times z \quad (34)$$

Água facilmente disponível (AFD) – a água no solo não está igualmente disponível para as plantas em todo o intervalo de umidade disponível. A dificuldade de a planta extrair a água do solo aumenta com a redução do conteúdo de água no solo, o que, em termos práticos, resulta na possibilidade de o solo limitar a evapotranspiração da cultura. Por isso, no manejo da irrigação, permite-se que planta esgote apenas uma fração da água disponível total (CAD) antes de se proceder a nova irrigação. Conhecendo-se o teor de água do solo a partir do qual o rendimento da cultura começa a ser reduzido (θ_{CR} - umidade crítica ou umidade ideal para iniciar a irrigação), o déficit máximo permitido de água no solo para manejo da irrigação ($D_{m\acute{a}x}$) poder ser calculado pela [equação \(35\)](#).

$$D_{m\acute{a}x}(mm) = AFD (mm) = 1000 (\theta_{CC} - \theta_{CR}) \times z (m) \quad (35)$$

Não se conhecendo a umidade ideal para manejo da irrigação pode-se calcular, aproximadamente, a água facilmente disponível do solo para as plantas utilizando um fator de depleção f ([Tabela 2](#)) que representa a fração máxima da CAD que pode ser utilizada pela cultura sem que se configure um déficit hídrico. Esta fração f define a água facilmente disponível do solo para as plantas (AFD), ou também chamada déficit máximo permitido de manejo ($D_{m\acute{a}x}$), e geralmente está compreendida entre 30% e 70%.

Uma regra geral para culturas de campo em muitas regiões áridas e semiáridas é que o déficit de umidade na zona radicular não seja superior a 50% da CAD, isto é, $f \leq 0,5$, ou $AFD \leq 0,5 CAD$. Mantendo-se a fração de esgotamento f ao longo do ciclo vegetativo e manejando-se a irrigação para a umidade atingir a CC na profundidade z após cada aplicação, a lâmina de água aplicada, calculada para z , será constante em cada evento de irrigação. Isto significa que a duração da irrigação também será constante, embora a frequência de aplicação varie em função de variações da ET_c durante o período de crescimento. Em regiões úmidas é necessário aproveitar as chuvas durante o período de irrigação. Entretanto, a fração máxima de esgotamento da umidade disponível do solo de 50% deve servir como um guia geral para as culturas de campo.

Tabela 2 – Máxima fração de esgotamento da água disponível do solo (f) para fins de irrigação sem estresse hídrico e evapotranspiração de cultivo (ET_c) de 5 mm d⁻¹ (ALLEN et al., 1998)

Cultura	Fator f	Cultura	Fator f
(A) Hortaliças pequeno porte		(F) Hortaliças Perenes	
Brócoli	0,45	Alcachofra	0,45
Couve-de Bruxelas	0,45	Aspargos	0,45
Repolho	0,45	Hortelã	0,40
Cenoura	0,35	Morango	0,20
Couve-flor	0,45	(G) Plantas Fibrosas	
Aipo	0,20	Algodão	0,65
Alface	0,30	(H) Plantas oleaginosas	
Cebola-seca	0,30	Mamona	0,50
Cebola-semente	0,35	Canola	0,60
Espinafre	0,20	Gergelim	0,60
Rabanete	0,30	Girassol	0,45
(B) Hortaliças – Solanáceas		(I) Cereais	
Berinjela	0,45	Cevada	0,55
Pimentão	0,30	Aveia	0,55
Tomate	0,40	Trigo	0,55
(C) Hortaliças – Curcubitáceas		Milho	0,55
Melão Cantalupe	0,45	Milheto	0,55
Pepino	0,50	Sorgo-grão	0,55
Abóbora	0,35	Arroz	0,20
Abobrinha	0,50	(J) Plantas forrageiras	
Melão	0,40	Pasto	0,60
Melancia	0,40	Gramado estação fria	0,40
(D) Raízes e Tubérculos		Gramado estação quente	0,50
Mandioca – 1º ano	0,35	(K) Cana-de-açúcar	
Mandioca – 2º ano	0,40	(L) Frutas tropicais e Árvores	
Beterraba	0,50	Banana	0,35
Batata	0,35	Cacau	0,30
Batata doce	0,65	Café	0,40
Nabo	0,50	Palmáceas	0,65
(E) Leguminosas		Abacaxi	0,50
Feijão vagem	0,45	Chá sem sombreamento	0,40
Feijão	0,45	Chá sombreado	0,45
Feijão mungo e feijão caupi	0,45	(M) Uva	
Grão-de-bico	0,50	Uva de mesa ou passa	0,35
Amendoim	0,50	Uva para vinho	0,45
Lentilha	0,50	(M) Árvores frutíferas	
Ervilha fresca	0,35	Maçã, cereja, pêra, pêssego e citros	0,50
Ervilha seca	0,40	Abacate	0,70
Soja	0,50	Kiwi	0,35

A AFD é, portanto, calculada pela equação (36) e representa a máxima lâmina de água que a planta pode consumir entre duas irrigações sucessivas, sem sofrer déficit hídrico, proporcionando rendimento máximo:

$$AFD = CAD \times f \quad (36)$$

A máxima fração de esgotamento f está relacionada com a suscetibilidade da cultura ao estresse hídrico e com o tipo de órgão ou parte da planta que se deseja colher. O valor de f difere de acordo com a cultura e com a demanda atmosférica. Como o potencial de água no solo possui relação específica com a umidade nos diferentes tipos de solos, o valor de f também varia com o tipo de solo. Em geral f varia de 0,30 para culturas com sistema radicular raso e altas taxas de demanda atmosférica ($ET_o > 8 \text{ mm d}^{-1}$) a 0,70 para plantas com sistema radicular profundo e baixa demanda atmosférica ($ET_o < 3 \text{ mm d}^{-1}$). A ET_o representa a evapotranspiração de referência. Valores entre 0,30 e 0,50 são utilizados para um grande número de culturas.

Os valores f da Tabela 2 foram sugeridos por Allen et al. (1998) para cultivos sem estresses hídrico e salino e ET_c de 5 mm dia^{-1} . Para clima quente e seco, com elevada ET_c , os valores de f são 10 a 25 % menores. Para baixos valores de ET_c , podem ser acrescidos em 20 %. Para solos argilosos, devem ser reduzidos de 5 a 10 % e, para solos arenosos, devem ser acrescidos em 5 a 10%. Para valores de ET_c diferentes de 5 mm d^{-1} os valores de f da Tabela 2 podem ser ajustados pela equação (37).

$$f = f_{tab} + 0,04 (5 - ET_c) \quad (37)$$

sendo f_{tab} o valor de f apresentado na Tabela 2.

Déficit atual de água no solo (D_{atual}) – conhecendo-se o teor de água no solo em qualquer instante (θ_A - umidade atual do solo), o déficit atual de água no solo (D_{atual}) é expresso pela equação (38). Quando $\theta_A = \theta_{CR}$ então $D_{atual} = AFD = D_{máx}$.

$$D_{atual}(mm) = 1000 (\theta_{CC} - \theta_{CR}) z \quad (38)$$

Exemplo 8 – Um perfil de solo possui as seguintes características:

Profundidade (cm)	U_{CC} (%)	U_{PMP} (%)	d_g
0 - 30	31,40	20,10	1,12
30 - 80	28,35	21,20	1,21
80 - 100	26,50	17,30	1,35

Calcular: (a) a disponibilidade total de água em cada camada; (b) a capacidade total de água disponível; (c) a água facilmente disponível para a cultura do feijão considerando a profundidade efetiva do sistema radicular de 40 cm e $ET_c = 5 \text{ mm d}^{-1}$.

Solução:

$$(a) \quad DTA (0 - 30) = 10 (0,314 - 0,201)1,12 = 1,27 \text{ mm cm}^{-1}$$

$$DTA (30 - 80) = 10 (0,2835 - 0,212)1,21 = 0,87 \text{ mm cm}^{-1}$$

$$DTA (80 - 100) = 10 (0,265 - 0,173)1,35 = 1,24 \text{ mm cm}^{-1}$$

(b) $CAD (0 - 30) = 1,27 \times 30 = 38,1 \text{ mm}$

$$CAD (30 - 80) = 0,87 \times 50 = 43,5 \text{ mm}$$

$$CAD (80 - 100) = 1,24 \times 20 = 24,8 \text{ mm}$$

- (c) Feijão: $f = 0,45$ (Tabela 2). O sistema radicular ocupa 30 cm na primeira camada e 10 cm na segunda camada:

$$AFD (0 - 40) = 0,45 \times 30 \times 1,27 + 0,45 \times 10 \times 0,87 = 21,06 \text{ mm}$$

IRRIGAÇÃO REAL NECESSÁRIA - *IRN*

A evapotranspiração determina a retirada de água do solo, reduz a umidade disponível para a planta e define a irrigação real necessária. A resposta à pergunta quanto irrigar passa pela definição da irrigação real necessária para o pleno desenvolvimento da cultura, também denominada lâmina líquida de irrigação. A irrigação real necessária (*IRN*) é definida como a quantidade de água necessária para suprir a evapotranspiração da cultura (*ETc*) que ocorre em excesso à precipitação efetiva (*PE*), para uma cultura livre de doenças que cresce em áreas extensas, sem restrições de água e em condições ótimas de fertilidade de solo. Além disso, a *IRN* considera as contribuições do lençol freático (*AC*) e as variações do armazenamento de água no solo (ΔA , mm) durante o período de interesse. Em condições de campo, considerando as plantas, o volume de solo ocupado pelas raízes e o clima, um ecossistema cultivado apresenta a seguinte necessidade de irrigação [equação (39)]:

$$IRN = ETc - PE - AC - \Delta A \quad (39)$$

sendo, $\Delta A = 1000 \Delta \theta z$, em que $\Delta \theta$ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) é a variação do teor de água do solo na zona radicular, no período considerado, e z a profundidade da camada de solo (m) que experimentou a variação de umidade. A unidade de cada termo da equação (39) é mm. A *IRN* é a porção da água de irrigação aplicada benéficamente consumida. A ascensão capilar é de difícil estimativa e só é significativa quando existe um lençol freático próximo da superfície. Em condições normais de terras irrigadas, pode ser desconsiderada na fase de projeto. A variação de armazenamento representa a quantidade de água armazenada no solo proveniente de chuvas e irrigações anteriores, que pode contribuir com as necessidades de água das plantas. Também, é desconsiderada para fins de projeto.

De toda água precipitada sobre a superfície de um terreno, uma parte infiltra e incorpora-se na zona radicular, outra parte percola em profundidade fora do alcance das raízes, outra parte escoia superficialmente e outra é interceptada pela vegetação de onde

evapora posteriormente. A *PE* representa a parte da precipitação total que infiltra e contribui para satisfazer a necessidade da cultura e depende da topografia local, do tipo de solo (textura e estrutura), da cobertura vegetal, da intensidade e frequência das precipitações, da demanda evaporativa da atmosfera, das práticas de manejo da cultura e do solo, da altura do lençol freático e da umidade do solo antes da chuva (BHUIYAN; UNDAN, 1990). Quando uma chuva ocorre logo após uma irrigação, praticamente não haverá efetividade e, quando ocorre alguns dias após a irrigação, a quantidade efetiva corresponde à lâmina que o solo é capaz de reter até a umidade da capacidade de campo.

A precipitação efetiva é definida por Dastane (1974) no contexto do manejo da irrigação, como a precipitação útil ou utilizável em qualquer fase de produção das culturas. A implicação desta definição é que a água deve infiltrar e permanecer residente na zona radicular efetiva de um campo cultivado por um tempo suficiente para ser extraída pelas raízes durante o processo de evapotranspiração ou para promover alguma redução da demanda de transpiração devido à evaporação do solo úmido.

Para fins práticos de irrigação, considera-se a *ETc* e a *PE* os dois termos mais importantes da equação (39) e a *IRN* é definida como:

$$IRN = \sum_{i=1}^n (ETc_i - PE_i) \quad (40)$$

sendo, *IRN* – irrigação real necessária (lâmina líquida de irrigação), mm; *n* – número de dias decorridos desde a última irrigação; *ETc_i* – evapotranspiração da cultura no dia *i*, mm; *PE_i* – precipitação efetiva no dia *i*, mm.

Para a estimativa diária da *ETc* utiliza-se um dos métodos preconizados na literatura específica. Já a estimativa da *PE* para períodos de um dia é muito difícil e trabalhosa. Para fins de projeto, com alta frequência de irrigação, em que utilizam as necessidades de água do cultivo em períodos de máxima demanda, a precipitação efetiva é frequentemente desconsiderada, resultando *IRN = ETc*. Para regiões úmidas, para compensar a não inclusão da precipitação efetiva, Bernardo, Soares e Mantovani (2006) sugerem que os projetos possam ser dimensionados com base em 80 a 90% da *ETc* de pico.

Assumindo-se determinadas condições, para fins de manejo da irrigação, a *PE* pode ser estimada em função da precipitação pluviométrica (*PREC*) e da lâmina de água necessária para que a umidade do solo retorne à capacidade de campo na camada de solo que corresponde à profundidade efetiva do sistema radicular (*D_{atual}*). Quando *PREC < D_{atual}* a água perdida por escoamento superficial é desprezível, então *PE = PREC*. Isto se baseia no fato de que, em áreas irrigadas a quantidade de água necessária para elevar a umidade do solo à *CC* é, geralmente, inferior a 20 a 30 mm e que, chuvas desta grandeza, raramente provocam escoamento superficial, exceto em solos de baixa permeabilidade, grandes declividades ou muito compactados. Já no caso de chuvas intensas, ou quando a deficiência atual de água no solo (*D_{atual}*) for pequena, pode ocorrer tanto escoamento superficial quanto drenagem profunda. Neste caso, assume-se que a precipitação pluvial, mesmo que provoque escoamento superficial, é suficiente para

e elevar a umidade do solo à CC . Assim, quando $PREC \geq D_{atual}$, considera-se $PE = D_{atual}$.

A máxima irrigação real necessária ($IRN_{m\acute{a}x}$), ou a máxima lâmina líquida de irrigação a ser incorporada ao solo, depende da capacidade do solo em armazenar água e disponibilizá-la para as plantas em uma taxa que atenda a ET_c e deve ser no máximo igual à AFD . Assim, para os sistemas de irrigação por aspersão calcula-se a $IRN_{m\acute{a}x}$ pela equação (41), considerando-se a fração f da CAD que o cultivo pode utilizar sem sofrer déficit hídrico e proporcionar rendimento máximo.

$$IRN_{m\acute{a}x} = AFD = CAD \times f \quad (41)$$

sendo, $IRN_{m\acute{a}x}$ – máxima irrigação real necessária (máxima lâmina líquida de irrigação), mm; CAD – capacidade total de água disponível do solo, mm; AFD – água facilmente disponível, mm; f – fator de depleção ou de esgotamento da água do solo, adimensional.

O máximo turno de rega ($TR_{m\acute{a}x}$), ou mínima frequência de irrigação, é o máximo número de dias entre duas irrigações sucessivas e pode ser calculado pela equação (42):

$$TR_{m\acute{a}x} = \frac{IRN_{m\acute{a}x} \text{ (mm)}}{ET_c \text{ (mm d}^{-1}\text{)}} \quad (42)$$

Exemplo 9 – Calcule a máxima irrigação real necessária e o máximo turno de rega para um sistema de irrigação por aspersão, considerando a cultura do milho e os seguintes dados de solo, planta e clima: capacidade de campo – 25 % em massa seca; ponto de murchamento permanente – 15 % em massa seca; densidade global do solo – 1,2; profundidade efetiva do sistema radicular – 0,50 m; fator de esgotamento da água do solo para $ET_c = 5 \text{ mm d}^{-1} - 0,55$; evapotranspiração de cultura em período de pico – 6 mm d^{-1} .

Solução:

$$f = 0,55 + 0,04 (5 - 6) = 0,51$$

$$IRN_{m\acute{a}x} = AFD = 10 (0,25 - 0,15) 1,2 \times 50 \times 0,52 = 30,6$$

$$TR_{m\acute{a}x} = \frac{30,6}{6} \cong 5 \text{ dias}$$

IRRIGAÇÃO TOTAL NECESSÁRIA – *ITN*

No campo, para satisfazer as necessidades líquidas de irrigação (IRN), devem ser aplicadas lâminas adicionais de irrigação para compensar as perdas de água por percolação, por evaporação e deriva por vento, pela não uniformidade de distribuição de água do sistema e para promover a lixiviação do excesso de sais na zona radicular.

Para irrigação por aspersão, os principais componentes da perda total de água na parcela são a percolação profunda, a evaporação no ar durante a aplicação, a evaporação do solo e por deriva pelo vento. Em regiões úmidas e vento fraco as perdas de água por evaporação e deriva são inferiores a 10% da água aplicada e nas regiões semi-áridas e áridas essas perdas podem superar 20% em condições climáticas severas.

Considere que a eficiência de aplicação de água (EA) contabiliza a perda total de água na parcela. A irrigação total necessária é definida da seguinte forma:

$$ITN = \frac{IRN}{EA} \quad (43)$$

A eficiência de aplicação de água na parcela (EA , adimensional) é definida pela relação entre usos benéficos de água na parcela e quantidade total de água aplicada, de forma que $EA = 1 - PT$, sendo PT as perdas totais de água na parcela (WANG et al., 1996). Ao se aplicar uma lâmina média unitária de água pelo sistema de irrigação, parte dessa água é evaporada e derivada por vento antes de atingir a superfície do solo. Por exemplo, tendo sido aplicada uma lâmina média de 1 unidade de altura de água e apenas 0,92 unidades atingido a superfície do solo para infiltração, define-se a eficiência de aplicação em potencial (EAP) de $0,92/1 = 0,92$ (92%), isto é, ocorreram 8% de perdas por evaporação e deriva. Neste caso, 92% da água aplicada ficaram disponíveis para infiltração. Parte dessa água infiltrada permanece armazenada na zona radicular para uso pelas plantas (uso benéfico) e parte percola abaixo da zona radicular (uso não benéfico). O excesso de água que percola é o resultado combinado das práticas de manejo da irrigação e da uniformidade de distribuição de água do sistema.

Supondo que das 0,92 unidades infiltradas, 0,87 unidades contribuíram efetivamente para satisfazer o déficit de evapotranspiração, define-se a eficiência de distribuição $ED = 0,87/0,92 = 0,9457$ (94,57%) e a percolação profunda $PP = 1 - ED = 0,0543$ (5,43%). Assim, a EA é a razão entre a quantidade de água útil armazenada na zona radicular e quantidade total de água aplicada ($0,87/1 = 0,87$), verificando-se $EA = EAP \times ED = 0,92 \times 0,9457 = 0,87$.

As perdas por escoamento superficial são aqui desconsideradas, porque, se existem, são resultantes de um manejo inadequado da irrigação. Para fins de projeto de sistemas de aspersão é razoável considerar EAP da ordem de 90% a 95% para climas com baixa demanda da atmosfera e com ventos fracos e 80% a 90% para climas com maiores demandas da atmosfera e ventos moderados (CONCEIÇÃO, 2002; MEDEIROS et al. 2001; PAZ, 1990). Para uma irrigação sem déficit hídrico, em que IRN é a lâmina mínima de irrigação infiltrada na área para satisfazer a evapotranspiração no período, pode-se expressar IRN da seguinte forma:

$$IRN = EAP \times E \times ITN = EA \times ITN \quad (44)$$

Necessidade de água para lixiviação de sais – LS

Todos os solos e todas as águas naturais de origem pluvial, superficial (rios, lagos e açudes) ou subterrânea, contêm sais dissolvidos em quantidades variadas. Mesmo quando se utilizam águas de irrigação com baixos teores salinos existe certo potencial de salinização em condições de baixa pluviosidade ou de drenagem insuficiente. Assim é que em regiões áridas e semi-áridas, onde existe pouca percolação profunda decorrente da precipitação natural que poderia satisfazer as necessidades de lixiviação, a salinidade assume grande importância, devendo-se estimar uma lâmina adicional de irrigação (LS) para lavagem do excesso de sais da camada de solo que contém o sistema radicular. Considerando a ocorrência de perdas de água por percolação profunda da ordem de 10 a 15%, não há necessidade de se aplicar uma quantidade adicional de água para o controle da salinidade quando o problema não está bem caracterizado, sendo que as chuvas podem assegurar a lixiviação satisfatória nestas condições.

A lixiviação dos sais é de grande importância para a irrigação bem sucedida onde a salinidade é excessiva. Constitui o único meio pelo qual a salinidade do solo pode ser mantida em níveis aceitáveis sem riscos para as culturas. Quanto mais salina é a água de irrigação ou mais sensível é a cultura à salinidade, mais lixiviação deve existir para manter o rendimento da cultura em nível elevado. A quantidade de sais que deve ser lixiviada abaixo da zona radicular da cultura depende da concentração de sais na água de irrigação e no solo, da tolerância da cultura à salinidade e do manejo da irrigação.

A necessidade de lixiviação representa a fração mínima da quantidade total de água aplicada que deve passar através da zona radicular, para prevenir a redução no rendimento econômico da cultura. Por ser a condutividade elétrica (CE) facilmente medida e quase linearmente relacionada com a concentração salina de uma solução do solo relativamente diluída, comumente substitui-se a concentração salina por CE (MEDEIROS; GHEYI, 1997). Na relação entre salinidade da água de drenagem (percolação) do solo (CE_d) e da água de irrigação (CE_i) assume-se que a concentração salina da água aumenta cerca de três vezes quando aplicada ao solo e, portanto, $CE_d = 3 CE_i$. Em termos de salinidade do extrato de saturação do solo (CE_e) pode-se fazer a seguinte aproximação: $CE_e = 1,5 CE_i$. Destas relações obtém-se que $CE_d = 2 CE_e$ (AYERS, 1977; SCALOPPI; BRITO, 1986).

A exigência de lixiviação representa a mínima razão de lixiviação (RL) a ser adotada para controlar a salinidade ao nível de tolerância da cultura. Keller e Bliesner (1990) recomendam o uso da equação (45) para o cálculo de RL para irrigação por aspersão de baixa frequência e a equação (46) para irrigação por aspersão de alta frequência:

$$RL = \frac{LS}{IRN + LS} = \frac{CE_i}{CE_d} = \frac{CE_i}{5 CE_e - CE_i} \quad (45)$$

$$RL = \frac{LS}{IRN + LS} = \frac{CE_i}{CE_d} = \frac{CE_i}{2 (\text{máx } CE_e)} \quad (46)$$

sendo, RL – razão de lixiviação, adimensional; LS – lâmina de irrigação para lixiviar o excesso de sais na zona radicular, mm; CE_i – condutividade elétrica da água de irrigação,

$dS\ m^{-1}$ ($mmhos\ cm^{-1}$); CE_d – condutividade elétrica da água de drenagem, $dS\ m^{-1}$ ($mmhos\ cm^{-1}$); CE_e – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona radicular para uma apropriada redução da produção (Tabela 3), $dS\ m^{-1}$ ($mmhos\ cm^{-1}$); $máxCE_e$ – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo que reduz a produtividade para zero (Tabela 3), $dS\ m^{-1}$ ($mmhos\ cm^{-1}$).

As culturas variam acentuadamente em relação à tolerância ao excesso de sais. Existem informações de tolerância à salinidade do extrato de saturação do solo para várias culturas, conforme pode ser observado na Tabela 3. Estas informações podem ser utilizadas para selecionar as culturas mais adaptadas à qualidade da água disponível para irrigação e ao nível médio de salinidade a que elas estarão submetidas. Quanto maior a concentração salina na zona radicular, menor será o número de culturas adaptadas e o retorno econômico. Keller e Bliesner (1990) recomendam que o valor de CE_e a ser utilizado na equação (45) seja aquele que proporciona redução de aproximadamente 10% na produção da cultura (Tabela 3).

Tabela 3 – Tolerância de culturas à salinidade do extrato de saturação do solo na zona radicular (CE_e , $dS\ m^{-1}$) (Scaloppi e Brito, 1986; Keller e Bliesner, 1990)

Cultura	Redução da produção esperada no nível de CE_e ($dS\ m^{-1}$) indicado				
	0 %	10 %	25 %	50 %	100 %
Extensivas					
Cevada	8,0	10	13	18,0	28,0
Algodoeiro	7,7	9,6	13	17,0	27,0
Beterraba açucareira	7,0	8,7	11	15,0	24,0
Trigo	6,0	7,4	9,5	13,0	20,0
Soja	5,0	5,5	6,2	7,5	10,0
Sorgo	4,0	5,1	7,2	11,0	18,0
Amendoim	3,2	3,5	4,1	4,9	6,5
Arroz irrigado	3,0	3,8	5,1	7,2	11,4
Milho	1,7	2,5	3,8	5,9	10,0
Feijoeiro de corda	1,3	2,0	3,1	4,9	8,5
Feijoeiro comum	1,0	1,5	2,3	3,6	6,5
Cana-de-açúcar	1,7	3,4	6,0	10,3	19,0
Frutíferas					
Figueira	2,7	3,8	5,5	8,4	14,0
Oliveira	2,7	3,8	5,5	8,4	14,0
Laranjeira	1,7	2,3	3,3	4,8	7,9
Limoeiro	1,7	2,3	3,3	4,8	7,9
Macieira	1,7	2,3	3,3	4,8	7,9
Pereira	1,7	2,3	3,3	4,8	7,9
Pessegueiro	1,7	2,2	2,9	4,1	6,5
Videira	1,5	2,5	4,1	6,7	12,0
Ameixeira	1,5	2,1	2,9	4,3	7,0
Framboeseira	1,5	2,0	2,6	3,8	6,0
Abacateiro	1,3	1,8	2,5	3,7	6,0
Morangueiro	1,0	1,3	1,8	2,5	4,0
Coqueiro	4,0	6,8	11,0	18,0	32
Damasco	1,6	2,0	2,7	3,8	6,0
Olerícolas					
Beterraba	4,0	5,1	6,8	9,6	15,0

Brócolis	2,8	3,9	5,5	8,2	13,5
Tomateiro	2,5	3,5	5,0	7,6	12,5
Abóbora	2,5	3,3	4,4	6,3	10,0
Melão Cantaloupe	2,2	3,6	5,7	9,1	16,0
Espinafre	2,0	3,3	5,3	8,6	15,0
Repolho	1,8	2,8	4,4	7,0	12,0
Batata	1,7	2,5	3,8	5,9	10,0
Batata doce	1,5	2,4	3,8	6,0	10,5
Pimentão	1,5	2,2	3,3	5,1	8,5
Alface	1,3	2,1	3,2	5,2	4,0
Rabanete	1,2	2,0	3,1	5,0	8,8
Cebola	1,2	1,8	2,8	4,3	7,2
Cenoura	1,0	1,7	2,8	4,6	8,0
Couve	1,8	2,8	4,3	6,9	12,0
Nabo	0,9	2,0	3,7	6,5	12
Pepino	2,5	3,2	4,4	6,3	10,0

Valores de $máxCE_e$ para diferentes culturas podem ser obtidos na [Tabela 3](#) para uma redução de 100 % da produção esperada. Já valores de $mínCE_e$ podem ser obtidos para uma redução de 0 % da produção esperada. Recomenda-se que $CE_i \leq (máxCE_e + mínCE_e)/2$, sendo $mínCE_e$ a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo que não causa decréscimo na produtividade. Uma vez determinada a razão de lixiviação (RL) e a IRN , a lâmina de lixiviação necessária (LS) pode ser determinada rearranjando os termos das [equações \(45\) e \(46\)](#). O valor de RL calculado representa a quantidade mínima de água, em termos de fração da água aplicada, que deve passar através da zona radicular para manter um balanço adequado de sais no solo e evitar redução antieconômica da produtividade da cultura pela salinidade.

A salinidade do solo deve ser continuamente monitorada e considerada no manejo da irrigação. Quando $RL > 0,1$ recomenda-se a aplicação de irrigações frequentes (diárias ou a cada dois dias) com suficiente quantidade adicional de água para manter um balanço adequado de sais na zona radicular da cultura. No regime de irrigação plena (irrigação sem déficit), quando $LR < 0,1$, as perdas por percolação nas áreas irrigadas durante o ano normalmente são suficientes para propiciar a lixiviação necessária.

Exemplo 10 – Calcular a razão de lixiviação e a lâmina adicional de lixiviação necessárias para um sistema de irrigação por aspersão, utilizado na cana-de-açúcar, considerando que a IRN é 25 mm e a condutividade elétrica da água de irrigação é $2,5 \text{ dS m}^{-1}$.

Solução:

Pela [Tabela 3](#), a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona radicular que proporciona 10 % de redução na produção é $3,4 \text{ dS m}^{-1}$. Aplicando a [equação \(45\)](#), tem-se:

$$RL = \frac{2,5}{5 \times 3,4 - 2,5} = 0,172$$

Reorganizando os termos da [equação \(45\)](#), tem-se:

$$LS = \frac{RL \times IRN}{1 - RL} = \frac{0,172 \times 25}{1 - 0,172} = 5,2 \text{ mm}$$

Irrigação total necessária – *ITN*

A irrigação total necessária (*ITN*, mm no período), muitas vezes denominada lâmina bruta de irrigação, deve considerar a eficiência de aplicação (*EA*) e a razão de lixiviação (*RL*) necessária para remoção do excesso de sais que acumula no perfil de solo. A lâmina de lixiviação necessária (*LS*, mm no período) é a lâmina adicional de água que deve ser acrescentada à *IRN/EA* para manter a salinidade do solo em nível adequado à planta. Dessa forma pode-se redefinir *ITN* da seguinte forma:

$$ITN = \frac{IRN}{EA} + LS \quad (47)$$

Para a aplicação prática da [equação \(47\)](#) consideram-se dois casos:

(a) quando $RL \leq 0,1$, ou as perdas de água por percolação $(1 - ED) \geq RL$ considera-se que não há necessidade de lâmina adicional para controle da salinidade e que as perdas por percolação são suficientes para promover a lavagem da zona radicular e manter o nível de salinidade em condição não prejudicial. Então:

$$ITN = \frac{IRN}{EA} = \frac{IRN}{ED \times EAP} \quad (48)$$

(b) quando $RL > 0,1$, ou as perdas por percolação são insignificantes e a lâmina de água percolada é inferior à lâmina necessária para satisfazer a lixiviação $[(1 - ED) < RL]$, deve-se provocar a percolação para evitar a salinização do solo e, neste caso, utiliza-se a [equação \(49\)](#). Para a irrigação por aspersão é comum considerar que as perdas por percolação decorrentes da não uniformidade de distribuição de água dos sistemas contribuem com aproximadamente 10 % das necessidades de lixiviação, razão pela qual aparece o fator 0,90 no numerador da [equação \(49\)](#). Neste caso tem-se:

$$ITN = \frac{0,9 \times IRN}{(1 - RL)EA} \quad (49)$$

Para o caso do [exemplo 10](#), considerando $EA = 85\%$, teremos:

$$ITN = \frac{0,9 \times 25}{(1 - 0,172)0,85} = 32 \text{ mm}$$

MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Complexidades associadas ao manejo da irrigação

O termo manejo da irrigação é geralmente usado para descrever o procedimento mediante o qual se determina a frequência de irrigação, a lâmina (ou volume) de água a aplicar em cada evento de irrigação e a intensidade de aplicação de água. O emprego de técnicas de manejo da irrigação permite responder a três questões básicas:

- Qual é o momento mais adequado para efetuar uma irrigação? A resposta a esta questão define o intervalo entre irrigações sucessivas (ou turno de rega), isto é, quando irrigar.
- Qual a quantidade de água que se deve aplicar em cada irrigação? A resposta define a lâmina ou volume de irrigação.
- Qual é o tempo necessário de aplicação de água? A resposta define a intensidade de aplicação de água (mm h^{-1} ; L h^{-1} , $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) e o tempo de um ciclo de irrigação (ou período de irrigação – tempo necessário para completar a irrigação de toda a área).

A resposta a estas questões são fundamentais para o manejo da irrigação. Para responder às duas primeiras questões devem-se conhecer as necessidades de água da cultura e as características do solo quanto a sua capacidade de armazenar água. Para responder à terceira questão devem-se considerar as características de infiltração de água no solo e a intensidade de aplicação de água do sistema, compatibilizando-as de forma a evitar o escoamento superficial, a percolação excessiva e deriva pelo vento.

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 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 complexidade e a natureza das especificidades locais constituem a grande dificuldade para a solução de muitos problemas potenciais na agricultura irrigada. Problemas e soluções são melhores diagnosticados em uma análise de causa e efeito, isto é, um dado problema pode ter, ao mesmo tempo, causa e efeito: por exemplo, 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 baixa uniformidade da produtividade das culturas. O uso de um calendário de irrigação inadequado pode ser causado por falta de treinamento dos irrigantes, pequeno nível de motivação, inadequado registro de dados,

etc. A identificação dos fatores envolvidos forma a base para um sistema hábil para a 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 só é possível se as pessoas envolvidas aplicarem o treinamento. Elas devem, portanto, ser motivadas e ter as facilidades necessárias.

A maior restrição para nosso entendimento sobre o uso da água na agricultura é a dificuldade associada com sua medida e quantificação. Medições e registros de umidade do solo, vazão, pressão do sistema, variáveis de clima são raros e providos de erros potenciais. A determinação correta da necessidade hídrica do cultivo em períodos específicos do seu desenvolvimento é difícil, se não impossível, para a grande parte dos irrigantes. Sem a previsão da lâmina de irrigação definida como objetivo é pouco provável que os agricultores apliquem a quantidade de água real necessária.

Sendo grande o número e distinta a natureza das variáveis que necessitam ser conhecidas (umidade do solo na capacidade de campo, conteúdo atual de água no solo, evapotranspiração do cultivo, uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação, profundidade das raízes, vazão disponível, vazão aplicada, indicadores econômicos, etc.) não é surpreendente que a eficiência de aplicação para a maioria dos irrigantes seja relativamente baixa. 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 reanalisar e considerar não só o quanto a água é produtiva, mas também qual a produtividade potencial que está sendo perdida pelo manejo inadequado do recurso hídrico. 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.

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 nos ambientes políticos, técnicos e econômicos. Têm ocorrido aprimoramentos no sentido de melhorar a eficiência de uso da água e a conservação da energia nos projetos de irrigação. Estes aprimoramentos têm seguido aproximações passo-a-passo e, enquanto se atenuam as restrições, novos desafios têm sido encontrados. É valioso observar a experiência de outros países na busca de modelos para o processo de desenvolvimento.

A avaliação contínua do desempenho dos sistemas de irrigação é essencial e necessita ser focada em três áreas: primeiro, entender 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 aumentar a eficiência do uso de água. Em decorrência de limitação na disponibilidade de recursos financeiros para os trabalhos de avaliação, deve-se atentar para a obtenção de resultados úteis e aplicados e para a extensão dos impactos obtidos. É necessário julgamento sobre a possibilidade de as 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.

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, focando-se, além da eficiência técnica e produtiva, a eficiência econômica. Esse novo enfoque é descrito na literatura 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.

Estratégias para o manejo da irrigação

As práticas convencionais de irrigação baseiam-se na necessidade de água da cultura, definida pela demanda evapotranspirométrica e na eficiência de aplicação de água. Disso decorre que a quantidade de água necessária à irrigação, considerando a parcela irrigada como referência, depende dos seguintes fatores: (a) clima – influenciando na evapotranspiração; (b) espécie vegetal, seu desenvolvimento e grau de cobertura do solo – influenciando na água de constituição dos tecidos, na transpiração e na evaporação do solo e da água depositada sobre o dossel vegetativo; (c) textura e estrutura do solo – influenciando na retenção de água, na percolação profunda e no escoamento superficial; (d) método de irrigação – influenciando na uniformidade de distribuição de água, nas perdas potenciais por evaporação, na percolação e no escoamento superficial; e (e) habilidade do irrigante no manejo da água – influenciando na eficiência da irrigação.

O planejamento de um projeto de irrigação visa ao bom dimensionamento das estruturas hidráulicas destinadas à captação, condução e distribuição da água na parcela (CARVALHO e OLIVEIRA, 2012). Uma das etapas do planejamento agrícola é a programação das irrigações, em que dois casos podem se apresentar:

- (a) **Irrigação total** – quando toda água necessária para atender a evapotranspiração da cultura, durante seu ciclo, é proveniente da irrigação. Nesse caso considera-se que a chuva não é suficiente para contribuir com a elevação da umidade do solo na zona

radicular. Esse tipo de irrigação é aplicado em regiões de clima árido ou semiárido, ou nas estações com precipitações insignificantes nas regiões úmidas e subúmidas.

- (b) **Irrigação suplementar** – quando a água necessária ao atendimento da demanda evapotranspirométrica da cultura no intervalo entre duas irrigações consecutivas, é proveniente, em parte, da irrigação e, em parte, da precipitação pluviométrica efetiva. É realizada em regiões úmidas e subúmidas para corrigir a má distribuição das chuvas. A precipitação efetiva é muito variável e de difícil estimativa em decorrência dos inúmeros fatores que afetam a ocorrência de chuvas e também na infiltração e retenção de água pelo solo. Na impossibilidade de uso da precipitação efetiva utiliza-se, para planejamento, a precipitação provável ao nível de 75 % de probabilidade (BERNARDO e HILL, 1978).

As estratégias para manejo da irrigação são as seguintes:

- **Irrigação sem déficit** - suprir plenamente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou suplementar (atendimento pleno da demanda por *ET* da cultura). Esta estratégia é implementada para maximizar a produtividade da cultura.
- **Irrigação com déficit** – programa-se suprir parcialmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou suplementar. O atendimento parcial da demanda de água da cultura é uma estratégia para economizar água e reduzir custos variáveis da irrigação. O déficit de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou somente nas fases menos críticas ao déficit hídrico. Neste último caso, são possíveis menores reduções na produtividade da cultura.
- **Irrigação de salvação** - suprir a necessidade de água da cultura somente num período relativamente curto ou num estágio de desenvolvimento do cultivo. Exemplo típico ocorre na irrigação da cana-de-açúcar, aplicando-se 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 (MATIOLI, 1998; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 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. Esta estratégia economiza água e reduz custos associados à irrigação.

Na irrigação sem déficit, o objetivo é aplicar uma quantidade média de água, capaz de suprir totalmente a necessidade da cultura 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 em determinada fração da área irrigada 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 programada 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, programada 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 mais 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 (produtividade física da água) ou maximizar a receita líquida por unidade de volume de água aplicada (produtividade econômica da água). Com esse objetivo, visa-se a aumentar a produtividade da água e economizá-la pelo aumento da eficiência de aplicação (eficiência técnica), redução das perdas por percolação, evaporação e vento, e redução da eficiência de armazenagem. Neste caso, pressupõe-se que a disponibilidade de água constitui limitação à produção agrícola, relativamente à disponibilidade de terra, e que o manejo da irrigação deve priorizar a minimização das perdas de água. Argumenta-se que, sendo a lâmina de irrigação 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. No caso em que a disponibilidade de terra é limitante, relativamente à disponibilidade de água, pode-se irrigar com déficit ao maximizar a receita líquida por unidade de área, sendo que o grau de déficit dependerá da relação entre preços do produto e da água.

As estratégias de manejo da irrigação podem ser estabelecidas de acordo com um ou mais dos seguintes objetivos:

- Alcançar a máxima produção por unidade de área – este é um critério puramente técnico, com objetivo de obter o máximo rendimento da cultura na área irrigada. Justifica-se onde a disponibilidade de área para cultivo é limitante, a disponibilidade de água para irrigação é abundante e os custos associados à irrigação são pequenos.
- Alcançar a máxima produção por unidade de volume de irrigação – este critério corresponde a maximizar a produtividade física da água. Justifica-se onde a disponibilidade de água para irrigação é limitante e a terra é abundante.
- Alcançar o máximo benefício econômico por unidade de área – este critério corresponde a maximizar a receita líquida da unidade técnica por unidade de área. Justifica-se onde a disponibilidade de terra para cultivo é limitante, a disponibilidade de água é abundante e os custos associados à irrigação são elevados.
- Alcançar o máximo benefício econômico por unidade de volume de água – corresponde a maximizar a receita líquida da unidade técnica por unidade de volume de água de irrigação (produtividade econômica da água). Justifica-se onde a disponibilidade de área para cultivo é abundante, a disponibilidade de água para irrigação é limitante e os custos associados à irrigação são elevados.

- Alcançar a máxima produção total da exploração agrícola – no contexto da segurança alimentar a maximização da produção total de alimentos, com restrição de água, pode ser uma preocupação mais importante. A área total a ser irrigada é determinada pela disponibilidade total de água e pela lâmina de irrigação. A máxima produção total de alimentos, com quantidade limitada de água, implica irrigações com lâminas inferiores à irrigação plena. Se a disponibilidade de água é restrita e a água economizada com a redução da lâmina de irrigação é usada para irrigar áreas adicionais, a área irrigada aumentará, reduzindo a produtividade, porém, aumentando o volume de produção.

Métodos para manejo da irrigação

Os métodos mais utilizados para o manejo da irrigação são baseados no turno de rega calculado, no balanço hídrico no solo, considerando como saída de água a evapotranspiração e como entrada a precipitação e a irrigação, e no potencial mátrico da água no solo. Também existem métodos baseado em observações e medições de vários atributos das plantas, entretanto o uso destes métodos ainda é insipiente, necessitando de muitos estudos. O método do turno de rega calculado, apesar de pouco criterioso, é um dos mais utilizados. Os métodos do balanço hídrico e do potencial mátrico da água no solo são mais eficientes e racionais para o controle da irrigação e devem ser preferidos.

A forma de distribuição de água ao usuário é um fator que influencia a seleção do método para manejo da irrigação. No caso de distribuição de água em rotação, em que o usuário recebe água em dias fixos, o que é comum em projetos de irrigação coletivos, o método do balanço de hídrico, a partir de um turno de rega fixo, seria um dos mais indicados. Já na distribuição de água por demanda, em que a água está sempre disponível ao usuário, ou em projetos de irrigação individuais, em que a água é bombeada pelo próprio usuário, as irrigações podem ser realizadas em regime de frequência variável, de acordo com as necessidades hídricas da cultura. Neste caso, pode usar o método do balanço hídrico ou do potencial mátrico no solo.

Manejo pelo turno de rega calculado – Este método não é criterioso para fins de manejo da irrigação, embora seja muito utilizado. Entretanto, é um método que possibilita o cálculo da vazão e o dimensionamento de tubulações, canais e motobombas para projetos de irrigação. Somente é recomendado para manejo da irrigação quando não se dispõe de dados ou equipamentos que permitam a utilização de um método mais eficiente (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 1996).

O manejo da irrigação por este método é realizado determinando-se previamente o intervalo entre irrigações dividindo-se a IRN pela ET_c [equação (50) ou (51)], para cada estágio de desenvolvimento da cultura. É função da CAD do solo, das condições climáticas e da cultura. A umidade ideal do solo para se efetuar a irrigação (θ_{CR}) deve ser determinada na curva de retenção de água do solo utilizando-se o potencial mátrico recomendado para a cultura (potencial mátrico crítico). Não se conhecendo os valores

críticos de umidade do solo ou o potencial mátrico crítico, pode-se utilizar o fator de depleção f .

$$TR (dias) = \frac{AFD (mm)}{ETc (mm d^{-1})} = \frac{1000 (\theta_{cc} - \theta_{CR}) z (m)}{ETc (mm d^{-1})} \quad (50)$$

$$TR (dias) = \frac{AFD (mm)}{ETc (mm d^{-1})} = \frac{1000 (\theta_{cc} - \theta_{PMP}) z (m) f}{ETc (mm d^{-1})} \quad (51)$$

Ao se calcular o TR a partir de uma ETc média mensal e histórica, igualmente distribuída durante o mês em questão, existe a possibilidade de a irrigação ser deficiente ou excessiva, já que não estão sendo consideradas as variações da demanda ao longo do tempo. Assim, o TR calculado não deve ser considerado como um valor rígido, mas sim como uma aproximação para a irrigação. A IRN pode ser calculada pela [equação \(52\)](#):

$$IRN (mm) = TR (dias) \times ETc (mm d^{-1}) \quad (52)$$

Manejo por balanço hídrico no solo – Baseia-se no balanço de água no solo considerando os fluxos de água que entram (irrigação, precipitação efetiva e ascensão capilar) e os fluxos que saem (evapotranspiração e percolação profunda), desconsiderando a entrada e a saída por escoamento superficial, que podem ser minimizadas aplicando-se a água em intensidade adequada. Também se deve minimizar a percolação profunda quando não há necessidade de lixiviar sais no perfil do solo. A ascensão capilar só é importante nos locais onde o lençol freático está próximo da superfície do solo ou quando as irrigações têm frequência muito baixa. Dessa forma, o manejo da irrigação pode ser feito pela determinação da ETc diária da cultura ou pela soma do consumo nos dias anteriores, subtraindo-se a precipitação efetiva desde a data da última irrigação.

De um modo geral, para fins de aplicação do balanço hídrico, há a necessidade de se conhecer a quantidade de água facilmente disponível (AFD) no solo em cada estágio de desenvolvimento da cultura, a precipitação e a ETc diária. Para irrigações frequentes, a evapotranspiração real da cultura (ETc_{real}) é muito próxima da ETc . O balanço hídrico considera que após a irrigação o solo está com umidade na capacidade de campo (armazenamento de água completo) e, a partir daí, a ETc é subtraída e a precipitação somada. Quando o consumo atingir a irrigação real necessária ($IRN \leq AFD$) realiza-se a irrigação, aplicando-se a lâmina bruta (ou volume bruto) prevista. Quando a precipitação efetiva exceder a capacidade de armazenamento de água do solo considera-se que a umidade do solo está na capacidade de campo e que o excedente constitui percolação profunda. Para o cálculo da CAD e da AFD em cada estágio de desenvolvimento da cultura é necessário conhecer a evolução da profundidade das raízes e para o cálculo da evapotranspiração é necessário conhecer a distribuição do coeficiente de cultura e a evolução da taxa de cobertura do solo pelas plantas.

Pelo método do balanço de água no solo é possível controlar a irrigação a partir de um TR variável ou fixo (predeterminado). Neste último caso, a lâmina líquida de irrigação (IRN) é determinada pela [equação \(40\)](#), sendo o valor de n igual ao número de dias do

turno de rega a ser adotado. A adoção de um TR fixo é conveniente para fins de controle da irrigação, uma vez que facilita consideravelmente a programação das irrigações e das práticas agrícolas. Existem condições em que a adoção de um TR fixo não é só conveniente, mas é necessário, como, por exemplo, em projetos de irrigação públicos coletivos, onde cada irrigante recebe água em dias previamente estabelecidos.

Por outro lado, a maior praticidade de uso de um TR fixo se dar em detrimento da eficiência da irrigação. Isto se dá porque, quando se fixa o TR , mesmo aplicando-se a IRN , a planta poderá sofrer deficiência de água quando o TR adotado é grande. Já quando TR é muito pequeno podem ocorrer problemas fitossanitários, desenvolvimento superficial de raízes e redução da concentração de oxigênio no solo. Alta frequência de irrigação é utilizada em solos arenosos, ou quando se utilizam sistemas irrigação por pivô central.

Exemplo 11 – Considere o manejo da irrigação na cultura do feijoeiro, com turno de rega variável, durante o período de pleno desenvolvimento vegetativo, utilizando o sistema de irrigação por aspersão. Neste exemplo será utilizado o tanque classe A para o cálculo da evapotranspiração de referência e o manejo será baseado na ET_c . Também será considerado que não há necessidade de lixiviação de sais. Para este período, considere os seguintes dados:

Período de pleno desenvolvimento vegetativo da cultura (64 a 80 dias após a emergência) – coeficiente de cultura (K_c) = 1,2; profundidade efetiva das raízes (z) = 0,40 m; fator de depleção de água (f) = 0,30; umidade do solo na capacidade de campo (U_{CC}) = 0,22 g g⁻¹; umidade do solo no ponto de murcha permanente (U_{PMP}) = 0,13 g g⁻¹; densidade global do solo (d_g) = 1,4; bordadura de grama ao redor do tanque classe A = 10 m.

Solução:

$$CAD = 10(0,22 - 0,13) \times 1,4 \times 40 = 50,4 \text{ mm}$$

$$AFD = 50,4 \times 0,30 = 15,1 \text{ mm}$$

Água residual no solo antes da irrigação = 50,4 – 15,1 = 35,3 mm. A irrigação será realizada no final do dia em que a água disponível atual no solo (DAA), atingir, aproximadamente, 35,3 mm. A solução se encontra na [Tabela 4](#).

Tabela 4 – Solução do exemplo 11, para manejo da irrigação com frequência variável.

DAE	ECA (mm)	U_2 (km d ⁻¹)	UR (%)	K_p	ET_o (mm)	K_c	ET_c (mm)	PE (mm)	IRN (mm)	DAA (mm)	
										Início	Final
									14,3	36,1/50,4	
64	5,67	140	60	0,75	4,25	1,2	5,1			50,4	45,3
65	5,23	155	50	0,75	4,00	1,2	4,8			45,3	40,5
66	3,41	100	80	0,85	2,90	1,2	3,5			40,5	37,0
67	2,74	130	85	0,85	2,33	1,2	2,8	10		37,0	44,2
68	4,70	110	90	0,85	4,00	1,2	4,8			44,2	39,4
69	4,56	180	80	0,75	3,42	1,2	4,1		15,1	39,4	35,3/50,4
70	2,56	205	90	0,75	1,92	1,2	2,3	5,0		50,4	53,1/50,4

71	3,00	203	90	0,75	2,25	1,2	2,7	4,0	50,4	51,7/50,4
72	3,33	200	85	0,75	2,50	1,2	3,0		50,4	47,4
73	4,67	185	80	0,75	3,50	1,2	4,2		47,4	43,2
74	4,32	100	80	0,85	3,67	1,2	4,4		43,2	38,8
75	5,09	135	85	0,85	4,33	1,2	5,2	16,8	38,8	33,6/50,4
76	3,62	115	90	0,85	3,08	1,2	3,7		50,4	46,7
77	3,33	205	90	0,75	2,50	1,2	3,0	4,0	46,7	47,7
78	4,51	130	85	0,85	3,83	1,2	4,6		47,7	43,1
79	5,77	180	80	0,75	4,33	1,2	5,2	12,5	43,1	37,9/50,4
80	5,49	150	88	0,85	4,67	1,2	5,6		50,4	44,8

DAE – dias após a emergência; *ECA* – Evaporação do tanque classe A; U_2 – velocidade média do vento a 2 m de altura; *UR* – umidade relativa média; *Kp* – coeficiente do tanque; *PE* – precipitação efetiva; *DAA* – disponibilidade atual de água no solo; $ET_o = Kp \times ECA$; $ET_c = ET_o \times Kc$.

Exemplo 12 – Considere o manejo de irrigação de uma cultura utilizando o método do balanço hídrico, com ET_o calculada pelo método de Penman-Monteith, utilizando-se os valores de *Kc* divulgados pelo Boletim FAO-56. No exemplo, o manejo da irrigação será efetuado para um período de 17 dias (50 *DAT* a 66 *DAT*). Considere que o turno de rega será de 4 dias e o solo possui $DTA = 180 \text{ mm m}^{-1}$ e que a profundidade efetiva das raízes nesse período é 0,40 m, portanto, $CAD = 72 \text{ mm}$. Determine a irrigação real necessária a cada dia corresponde a $TR = 4$ dias, assumido que no início do dia 50 a umidade do solo correspondia à capacidade de campo.

Solução:

Na [Tabela 5](#) são apresentados os cálculos necessários ao manejo da irrigação com $TR = 4$ dias para as condições propostas no [exemplo 12](#).

Tabela 5 – Solução do [exemplo 12](#), para manejo da irrigação com $TR = 4$ dias

<i>DAT</i>	ET_o (mm)	<i>Kc</i>	ET_c (mm)	<i>PE</i> (mm)	<i>IRN</i> (mm)	<i>DAA</i> (mm)	
						Início	Final
50	2,5	0,96	2,4			72,0	69,6
51	2,4	0,98	2,4			69,6	67,2
52	3,2	0,99	3,2			67,2	64,0
53	3,5	1,00	3,5		11,5	64,0	60,5/72,2
54	3,2	1,01	3,2			72,0	68,8
55	3,1	1,02	3,2			68,8	65,6
56	2,8	1,02	2,9	5,0		65,6	67,7
57	3,1	1,02	3,2		7,5	67,7	64,5/72,0
58	3,5	1,02	3,6			72,0	68,4
59	3,6	1,02	3,7			68,4	64,7
60	3,5	1,02	3,6			64,7	61,1
61	3,8	1,02	3,9		14,8	61,1	57,2/72,0
62	3,7	1,01	3,7			72,0	68,3
63	2,4	0,98	2,4	8,0		68,3	73,9/72,0
64	3,0	0,97	2,9			72,0	69,1
65	3,4	0,96	3,3		6,2	69,1	65,8/7,0
66	3,5	0,95	3,3			72,0	68,7

Manejo por monitoramento da umidade ou do potencial mátrico no solo – O manejo da irrigação por monitoramento da água no solo considera a disponibilidade de água no solo em que se desenvolve a cultura. Para o manejo das irrigações, neste caso, são necessárias informações como: profundidade efetiva das raízes, capacidade de água disponível do solo, fator de depleção de água no solo, teor de água crítico ou potencial mátrico crítico para a cultura. O objetivo é irrigar quando o teor de água ou o potencial mátrico atingir um valor crítico, aplicando uma quantidade de água suficiente para elevar o armazenamento de água no solo até a capacidade de campo. A aplicação deste fator f possibilita determinar a quantidade de água facilmente disponível do solo para as plantas (AFD) que representa a máxima irrigação real necessária (IRN). Desta forma, toda vez que a planta consumiu no máximo uma lâmina de água igual a AFD aplica-se essa quantidade de irrigação (IRN).

O potencial mátrico crítico, determinado na região de maior concentração de raízes, indica o valor até o qual as irrigações devem ser realizadas sem que ocorram prejuízos para a produtividade. Na [Tabela 6](#) são apresentados valores de potencial mátrico crítico para algumas culturas. Quando é atingido este potencial, a IRN corresponde à quantidade de água que se deve aplicar para elevar o teor atual de água do solo à capacidade de campo. Os valores da [Tabela 6](#) são mais recomendados para solos não salinos e para os métodos de irrigação por aspersão e por superfície.

Tabela 6 – Potencial mátrico crítico da água no solo para definir o momento da irrigação para obtenção de produtividade máxima de algumas culturas.

Cultura	Potencial mátrico crítico* (Kpa)	Cultura	Potencial mátrico crítico (Kpa)
Alface	- (20 – 30)	Cana-de-açúcar	- (80 – 150)
Alho	- (15 – 30)	Tomate salada	- (30 – 100)
Batata	- (20 – 40)	Tomate industrial	- (100 – 400)
Cebola	- (15 – 45)	Melão	- (30 – 50)
Couve-flor	- (60 – 70)	Melancia	- (30 – 50)
Ervilha verde	- (20 – 30)	Morango	- (20 – 30)
Pepino	- 100	Abacate	- 50
Pimenta	- (20 – 40)	Banana	- (30 – 50)
Pimentão	- (30 – 50)	Coco	- (20 – 60)
Morango	- (10 – 35)	Laranja	- (20 – 100)
Repolho	- (30 – 50)	Maçã	- (50 – 80)
Vagem	- (25 – 70)	Uva	- (15 – 50)

*Valores à esquerda: evapotranspiração alta ($> 5 \text{ mm dia}^{-1}$) e períodos críticos ao déficit hídrico. Para condições de água ou solos salinos os valores recomendados devem ser superiores aos apresentados.

Existem vários instrumentos e métodos que podem ser utilizados para a determinação da água no solo. O método gravimétrico determina diretamente o teor de água em uma amostra de solo. É considerado padrão por ser muito preciso, mas demanda tempo e muita mão-de-obra. É mais utilizado para aferição de outros métodos. Dentre os diversos instrumentos existentes, para uso em lavouras irrigadas destacam-se os tensiômetros e sensores de resistência elétrica. O tensiômetro tem sido utilizado com

sucesso no manejo da irrigação de diferentes culturas em vários locais. Com este instrumento determina-se diretamente o potencial mátrico da água no solo e, indiretamente por uma curva de retenção, infere-se sobre o grau de umidade atual, o qual é utilizado para calcular a lâmina de irrigação necessária. Uma desvantagem do tensiômetro é medir o potencial mátrico em uma faixa estreita (0 à - 80 kPa). Para potenciais inferiores a - 80 kPa podem ser utilizados métodos eletrométricos com os blocos de resistência elétrica adequadamente calibrados.

Para o manejo das irrigações devem ser instalados sensores, no mínimo, em duas profundidades: 1/3 e 2/3 da profundidade efetiva das raízes. Outras recomendações são: (a) profundidade efetiva das raízes menor que 0,40 m – as medições são feitas apenas em uma profundidade: 1/2 z (controla quando e quanto irrigar); (b) profundidade efetiva das raízes entre 0,40 m e 0,60 m - medições são feitas em duas profundidades: 1/4 z (controla quando irrigar) e 3/4 z (a quantidade de irrigação é calculada com base nas medições nas duas profundidades); (c) profundidade efetiva das raízes superior a 0,60 m - as medições são feitas em 3 profundidades: 1/6 z; 1/2 z (controla quando irrigar) e 5/6 z (a quantidade de irrigação é calculada com base nas medições das três profundidades). Para cultivos em linha recomenda-se instalar os sensores entre as plantas na linha de plantio, evitando depressões e elevações do terreno. Para árvores, instalar afastado do tronco, a uma distância correspondente ao terço externo entre o tronco e a projeção da copa.

Exemplo 13 – Um agricultor está utilizando tensiômetros para manejar as irrigações na cultura do repolho, que deve ser irrigada sempre que o potencial mátrico atingir - 40 kPa na profundidade de 0,15 m. A irrigação deve ser realizada considerando uma profundidade efetiva de raízes de 0,30 m. Quando $\psi_m = -40$ kPa, a umidade média no perfil de solo até 0,30 m, obtida através da curva de retenção, é $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a capacidade de campo é $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Determinar a lâmina líquida de irrigação.

Solução:

$$\psi_{mCR} = -40 \text{ kPa} \text{ (potencial mátrico crítico – Tabela 6)}$$

$$\theta_{CR} = 0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ (obtida na curva de retenção do solo)}$$

$$\theta_{CC} = 0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$IRN = 10 (0,42 - 0,37) \times 30 = 15 \text{ mm.}$$

Exemplo 14 – Considere a irrigação da cultura do tomate com profundidade efetiva das raízes de 0,50 m. Para controle das irrigações estão sendo utilizados tensiômetros instalados a 0,125 m (tensiômetro A, controlando a camada 0 – 0,25 m) e a 0,375 m (tensiômetro B, controlando a camada 0,25 – 0,50 m). O tomate deve ser irrigado sempre que ψ_{mCR} registrado pelo tensiômetro A for - 50 kPa (potencial mátrico crítico). Neste momento, o tensiômetro B registra - 60 kPa. Os teores médios de água no solo correspondentes a esses potenciais mátricos são $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para a camada 0 – 0,25 m

e $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para a camada $0,20 - 0,50 \text{ m}$. Considerando que os teores de umidade na capacidade de campo nas respectivas camadas são $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, calcular a lâmina de irrigação real necessária.

Solução:

Camada	Tensiômetro	Profundidade (m)	ψ_m (kPa)	θ_{CR} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_{CC} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	IRN (mm)
0 – 0,25	A	12,5	- 50	0,35	0,42	17,5
0,25 – 0,50	B	37,5	- 60	0,30	0,38	20,0
0 – 0,50						37,5

Exemplo 15 – Um agricultor utiliza o método das pesagens para determinar a umidade do solo e manejar a irrigação em uma gleba cultivada com feijão, em regime de turno de rega fixo. A DTA de água do solo é 150 mm m^{-1} . Visando a determinação da umidade obteve a massa padrão de 790 g. Quatro dias após a última irrigação, utilizando-se o mesmo conjunto da obtenção do padrão, determinou a massa de 778 g com solo na umidade atual. Considerando a densidade global do solo 1,3 e densidade das partículas 2,65, calcular: (a) o teor de água do solo à base de massa seca; (b) a IRN, considerando $\theta_{cc} = 0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ até a profundidade de 0,30 m; (c) a fração (f) da CAD que a cultura consumiu antes da irrigação.

Solução:

$$U_u = (790 - 778) \frac{2,65}{2,65 - 1} = 19,3\% \text{ (à base de massa úmida)}$$

$$U_s = \frac{19,3}{100 - 19,3} = 0,239 \text{ g g}^{-1} \text{ (23,9 \% à base de massa seca)}$$

$$\theta = 1,239 \times 1,3 = 0,311 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ (31,1 \% à base de volume)}$$

$$IRN = 10 \times (0,38 - 0,311) \times 30 = 20,7 \text{ mm}$$

$$f = \frac{20,7}{150 \times 0,30} = 0,46 \text{ (antes da nova irrigação a planta consumiu 46\% da CAD)}$$

Manejo por monitoramento do estado hídrico da planta – O manejo das irrigações via planta pode ser realizado por avaliações visuais do estado hídrico das plantas e por medições. A avaliação visual é uma forma subjetiva para verificar estresse hídrico nas plantas, pois os sintomas são muito dependentes da espécie vegetal. Na maioria das vezes, quando os sintomas se manifestam, a planta já se encontra com deficiência de água por algum tempo. A sintomatologia geral das plantas com estresse hídrico é a perda de turgescência, enrolamento da folha, encurtamento de entrenós, mudança de coloração das folhas passando para um verde azulado, mudança do ângulo de inserção das folhas,

aumento da temperatura das folhas pelo fechamento dos estômatos. Em médios e longos prazos, as plantas crescem menos, desenvolvem menor área foliar, ocorre amarelecimento e senescência das folhas inferiores e morte das raízes superficiais.

Para o manejo por medição do estado hídrico das plantas existem inúmeros métodos que avaliam a temperatura foliar, o potencial de água nas folhas, a resistência estomática, o grau de turgescência das plantas, o diâmetro do caule, o fluxo de seiva, a concentração osmótica do suco celular, a intensidade de transpiração etc. Para obter detalhes sobre esses métodos pode-se recorrer às discussões apresentada por [Gomide \(1998\)](#) e [Pires et al. \(2001\)](#).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, C.R. da; COELHO, E.F. Monitoramento do teor de água no solo. In: AGUIAR NETTO, A.; BASTOS, E.A. (Ed.). **Princípios agronômicos da irrigação**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 262p.

AYERS, R.S. Quality of water for irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.103, n.2, p.135-154, 1977.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p.

BERNARDO, S.; HILL, R.W. Um modelo para determinação de irrigação suplementar. **Revista Ceres**, v.25, n.140, p.345-362, 1978.

BHUIYAN, S.I.; UNDAN, R.C. Irrigation for tropical areas. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, K.H.; SOLOMON, K.H. (Ed.). **Management of Farm Irrigation Systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1990, p.581-627 - 149.

BOUYOUCOS, G. J.; MICK, A. H., **An Electrical Resistance Method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions**. Tech. Bull. Mich. (St. Coll.) Agric. Exp. Stn, 1(172):18, Apr 1940.

CARVALHO, D.F. de; OLIVEIRA, L.F.C. de. **Planejamento e manejo da água na agricultura**. Viçosa: Editora UFV, 2012. 239p.

COLEMAN, E.A.; HENDRIX, T.M., Fiberglass Electrical Soil Moisture Instrument. **Soil Science**, v.1, n.67, p.425-438, 1949.

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002. 318p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

DASTANE, N.G. **Effective rainfall in irrigated agriculture**. Roma: FAO, 1974. 62p. (FAO - Irrigation and Drainage Paper 25).

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geol. Surv. Can. Part A Paper**, [S. L.], v. 75, p. 75-79, 1975.

GOMIDE, R.L. Instrumentação e métodos de medição na planta. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. (Ed.) **Manejo da Irrigação**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. P.158-168.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 625p.

LIMA, F. M. C. **Caracterização de um sensor para determinação da água disponível no solo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal da Paraíba, 1997.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI: EMBRAPA-CNPQ, 1996. 72 p.

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.

MEDEIROS, J.F.; GHEYI, H.R. Manejo do sistema solo-água-planta em solos afetados por sais. In: GUEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. Ed. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB, 1997. 383p.

MEDEIROS, M.G.A.; MATOS, J.A.; AZEVEDO, C.A.V de.; DANTAS NETO, J. Influência de fatores climáticos na eficiência potencial de aplicação de água do microaspersor Naan 7110 em condições de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, Lavras, 1998. **Anais** Lavras: UFLA; SBEA, 2001. v2, p.142-144.

MIRANDA, E.P.; MARTINS, G.S.; CARMO, F.F.; LIMA, L.D.P.; SILVA, F.M. Uso do forno de micro-ondas na determinação da umidade de um solo franco-siltoso. In: IV WINOTEC/Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, I, 2012, Fortaleza. **Resumos...**, Fortaleza: INOVAGRI, 2012. p. 201-203.

PAZ, V.P.S. **Perdas de água e uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. Viçosa, 1990, 59p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

PEREIRA, L.S.; VALERO, J.A.J.; BUENDÍA, M.R.P.; MARTÍN-BENITO, J.M.T. **El riego e sus tecnologías**. Albacete: CREA-UCLM, 2010, 296p.

PIRES, R.C.M.; ARRUDA, F.B.; FOLEGATTI, M.V. Necessidades hídricas das culturas e manejo da irrigação. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, J.C.M. Ed. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p. (Série Engenharia Agrícola, 1).

SCALOPPI, E.J.; BRITO, R.A.L. Qualidade da água e do solo para irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.80-94, 1986.

SOARES, A.F.; SILVA, J.S.V. dos. **Uniformização da legenda de solos do Brasil ao milionésimo**. 1ª ed. Campinas – SP: Documentos/Embrapa Informática Agropecuária, 49, 2005, 32p.

TAVARES, M.H.F; CARDOSO, D.L.; GENTELINI, D.P.; GABRIEL FILHO, A.; KONOPATSKI, E.A. Uso do forno de micro-ondas na determinação da umidade em diferentes tipos de solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.29, n.3, p.529-538, 2008.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.574-582, 1980.

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

NOTAÇÃO

AC	– ascensão capilar, (L)
AFD	– água facilmente disponível, (L)
c	– velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo, (LT^{-1})
CAD	– capacidade de água disponível, (L)
CC	– capacidade de campo, adimensional
CE_i	– condutividade elétrica da água de irrigação, $dS m^{-1}$ ou $mmhos cm^{-1}$
CE_i	– condutividade elétrica da água de irrigação $dS m^{-1}$, ou $mmhos cm^{-1}$
CE_d	– condutividade elétrica da água de drenagem, $dS m^{-1}$ ou $mmhos cm^{-1}$
D_{atual}	– déficit atual de água no solo, (L)
$D_{máx}$	– déficit máximo permitido de água no solo para manejo da irrigação, (L)
d_p	– densidade de partículas (adimensional)
DTA	– disponibilidade total de água no solo, (L)
EA	– eficiência de aplicação de água na parcela, décimos

EAP	– eficiência de aplicação em potencial, décimos
ED	– eficiência de distribuição, décimos
E_p	– energia potencial de um corpo, (ML^2T^{-2})
ET	– Evapotranspiração, (LT^{-1})
ET_c	– evapotranspiração da cultura, (LT^{-1})
ET_{c_i}	– evapotranspiração da cultura no dia i , (L)
ET_o	– evapotranspiração de referência, (LT^{-1})
f	– fator de depleção ou fração de esgotamento da água no solo, adimensional
g	– aceleração da gravidade, (LT^{-2})
$grad\psi_s$	– gradiente de potencial mátrico, $(L L^{-1})$
$grad\psi_t$	– gradiente de potencial gravitacional, $(L L^{-1})$
h	– lâmina de água armazenada no solo, (L)
H	– altura de um corpo em relação a um plano de referência, (L)
IRN	– irrigação real necessária, (L)
$IRN_{máx}$	– máxima irrigação real necessária, (L)
ITN	– irrigação total necessária, (L)
L	– comprimento da sonda, (L)
LS	– lâmina de irrigação para lixiviar o excesso de sais na zona radicular, (L)
LV	– leitura observada no vacuômetro, (L)
m	– massa, (M)
M	– massa de amostra de solo com água em balão volumétrico, (M)
M_a	– massa de ar em uma amostra de solo, (M)
$máxCE$	– condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona radicular que reduz a produtividade a zero $(dS m^{-1}$ ou $mmhos cm^{-1})$
M_p	– massa da amostra de solo seco em estufa com água em balão volumétrico, (M)
M_s	– massa da amostra de solo seco em estufa, (M)
M_t	– massa da amostra de solo úmido (M)
n	– número de dias decorridos desde a última irrigação, (T)
P	– pressão hidrostática, $(ML^{-1}T^{-2})$
P_t	– porosidade total do solo, (L^3L^{-3})
PE	– precipitação efetiva, (L)
PE_i	– precipitação efetiva no dia i , (L)
PMP	– ponto de murcha permanente, adimensional
PP	– percolação profunda, décimos
P_r	– porosidade livre de água, (L^3L^{-3})
$PREC$	– precipitação pluviométrica, (L)
PT	– perdas totais de água na parcela, décimos
RL	– razão de lixiviação, adimensional
t	– tempo de trânsito das ondas eletromagnéticas na sonda, (T)
TR	– turno de rega, (T)
$TR_{máx}$	– máximo turno de rega, (T)
U_{CC}	– umidade na capacidade de campo em base de massa seca, $(M^3 M^{-3})$
U_{PMP}	– umidade no ponto de murcha permanente em base de massa seca, $(M^3 M^{-3})$
U_s	– umidade do solo à base de massa seca, $(M^3 M^{-3})$

U_u	– umidade à base de massa úmida, ($M^3 M^{-3}$)
v	– velocidade de propagação da onda eletromagnética, ($L T^{-1}$)
V	– Volume, (L^3)
V_a	– volume de ar na amostra de solo, (L^3)
V_p	– volume de poros na amostra de solo, (L^3)
V_s	– volume de sólidos na amostra de solo, (L^3)
V_t	– volume total da amostra de solo, (L^3)
V_v	– volume total de poros na amostra de solo, (L^3)
V_w	– volume de água na amostra de solo, (L^3)
w	– peso de um corpo, (MLT^{-2})
z	– profundidade efetiva do sistema radicular, (L)
z_g	– desnível geométrico, (L)
z_p	– profundidade de um ponto p no perfil do solo, (L)
Δz_i	– espessura da camada de solo i , (L)
Δh	– variação do armazenamento de água no solo, (L)
Δt	– intervalo de tempo, (T)
ΔA	– variação do armazenamento de água no solo, (L)
ε	– constante dielétrica aparente do meio, ($T^2 M^{-2}$)
γ	– peso específico da substância, ($ML^{-2}T^{-2}$)
ψ	– potencial total de água no solo, (L)
ψ_g	– potencial gravitacional da água no solo, (L)
ψ_H	– potencial hidráulico no solo, (L)
ψ_m	– potencial mátrico do solo, (L)
ψ_{massa}	– energia por unidade de massa, ($L^2 T^{-2}$)
ψ_{mCR}	– potencial mátrico crítico para início a irrigação, (L)
ψ_o	– potencial osmótico, (L)
ψ_p	– potencial de pressão da água no solo, (L)
$\psi_{padrão}$	– estado da água pura e livre submetida a condições normais de temperatura e pressão, (L)
ψ_{peso}	– energia por unidade de peso, (L)
$\psi_{volumé}$	– energia por unidade de volume, ($ML^{-1}T^{-2}$)
ρ	– massa específica, (ML^{-3})
ρ_p	– massa específica das partículas do solo, (ML^{-3})
ρ_p	– massa específica das partículas do solo, (ML^{-3})
ρ_g	– massa específica global (ML^{-3})
θ	– umidade do solo à base de volume, ($L^3 L^{-3}$)
θ_A	– umidade atual do solo à base de volume atual do solo, ($L^3 L^{-3}$)
θ_{CC}	– umidade do solo na capacidade de campo em base de volume, ($L^3 L^{-3}$)
θ_{CR}	– umidade crítica do solo ou umidade ideal para iniciar a irrigação, ($L^3 L^{-3}$)
$\bar{\theta}_i$	– Umidade média do solo na camada i , ($L^3 L^{-3}$)
θ_{PMP}	– umidade do solo no ponto de murcha permanente em base de volume, ($L^3 L^{-3}$)
θ_r	– grau de saturação do solo, ($L^3 L^{-3}$)