

# Capítulo 1

## **Relação solo-planta-atmosfera**

Maurício Antonio Coelho Filho

Luís Henrique Bassoi

Luiz Roberto Angelocci

Eugênio Ferreira Coelho

Francisco Adriano de Carvalho Pereira



# Importância da água para os vegetais

Entre os fatores do ambiente que afetam o crescimento vegetal e a produtividade agrícola, a disponibilidade hídrica é o mais importante na maioria das regiões, pois define o grau de aptidão climática das regiões às culturas. A deficiência ou o excesso hídricos devem ser considerados no manejo agrícola, e exigem muitas vezes a intervenção humana por meio da irrigação para corrigir ou minimizar essa deficiência.

A importância ecofisiológica da água decorre do papel fundamental que ela tem para os vegetais, não somente por ser o seu constituinte em maior proporção, representando até cerca de 95% da massa fresca de órgãos como os frutos e as folhas novas, mas também por apresentar propriedades únicas de viscosidade, tensão superficial, constante dielétrica, calor específico, e calor latente de vaporização e de forças de adesão e coesão, que a fazem ter funções importantes. São elas: a) dar estabilidade térmica tanto aos tecidos como ao ambiente (elevado calor específico,  $C_p = 4.182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); b) fazer o controle térmico das folhas pelo processo de transpiração (elevado calor latente de vaporização,  $\lambda = 2,454 \text{ MJ kg}^{-1}$  a  $20^\circ \text{C}$ ); c) ser solvente natural e meio para reações bioquímicas (elevada constante dielétrica,  $D = 80,2$  a  $20^\circ \text{C}$ ) e para transporte de nutrientes do solo para a copa das plantas, com redistribuição entre os respectivos órgãos; d) representar um meio contínuo na planta (forças de adesão, coesão e tensão superficial), interligando o sistema solo-planta-atmosfera; e) responder pela pressão de turgescência das células e, conseqüentemente, ser responsável pela expansão celular (JONES; TARDIEU, 1998) e rigidez das plantas, sendo esta a pressão que fornece suporte aos caules.

Pelas inúmeras funções exercidas pela água no complexo vegetal, é importante o seu adequado suprimento para a obtenção das máximas produtividades das culturas. A deficiência hídrica pode causar desde a simples paralisação temporária do crescimento e do desenvolvimento vegetal até a morte por secagem completa e incapacidade do vegetal em retomar as suas atividades fisiológicas após um período de deficiência severa. Quando promovida por um período de veranico ou por uma seca prolongada em regiões subúmidas e semiáridas, ela terá atuação diferente de acordo com a espécie cultivada. Geralmente, plantas que apresentam ciclo curto, como as hortaliças, sofrem muito mais os efeitos de deficiência hídrica do que as espécies perenes. Isso justifica os cuidados que devem ser empregados nas plantas sensíveis ao déficit hídrico quanto à manutenção das condições

ótimas de água no solo ao longo de todo o ciclo produtivo, evitando-se mesmo pequenos períodos de deficiência, pois podem refletir não somente em decréscimo do crescimento vegetal e da produtividade, mas também da qualidade do produto.

Embora o manejo de água usualmente envolva a manutenção de elevados potenciais da água dos vegetais mediante um apropriado manejo de irrigação, o deficit de irrigação em fruteiras ou o uso de elevados índices de salinidade na água de irrigação do tomate (HO, 1988) podem favorecer o aumento da qualidade de frutos pelo aumento da porcentagem de matéria seca e conteúdo de açúcares (JONES; TARDIEU, 1998). O deficit hídrico também pode ser utilizado para o manejo de florações em fruteiras, nesse caso, ele induz o florescimento, prática muito comum na cultura da lima ácida 'Tahiti' nas condições semiáridas do Nordeste. Para a cultura da manga, a deficiência hídrica é um artifício utilizado em conjunto com a aplicação de reguladores de crescimento no repouso da planta, auxiliando a maturação dos ramos, ou, isoladamente, em condições semiáridas (FONSECA, 2002), substituindo totalmente os reguladores de crescimento.

Em plantas perenes, tendo como exemplo muitas fruteiras tropicais, os pequenos períodos de deficiência podem não resultar em perdas de produtividade e qualidade, haja vista os resultados de estudos envolvendo a regulação do deficit de irrigação em citros (DOMINGO et al., 1996; GONZÁLEZ-ALTOZANO; CASTEL, 1999). É possível a manutenção da produtividade e qualidade, aplicando uma deficiência regulada de água em fases de frutificação menos sensíveis à deficiência, mantendo os níveis de produtividade e qualidade compatíveis com os tratamentos irrigados em todas as fases, com redução de até 30% do volume total de irrigação, e dependendo do regime de chuvas ao longo do desenvolvimento dos frutos.

É importante uma análise diferenciada do estresse por falta de água nos diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento das plantas. Por exemplo, um vegetal apresenta sua maior tolerância ao deficit hídrico ainda na forma de semente, quando sua umidade é extremamente reduzida em relação a vegetais em crescimento e a sua hidratação é o ponto de partida para a continuação do ciclo da planta. O efeito da falta de água é notável na fase de plântula, quando a existência de um sistema radicular pouco desenvolvido não permite a sobrevivência em deficiência prolongada, e principalmente nas fases reprodutivas, por causa das perdas na produtividade do vegetal. A maior parte da produção agrícola é de órgãos reprodutivos, como grãos, frutas e olerícolas, e sua produtividade pode ser afetada pela falta de água nesse período (PIMENTEL, 1998).

Salienta-se que existem vários mecanismos fisiológicos que conferem à planta maior ou menor capacidade de tolerar a seca, como a estrutura anatômica das folhas, o total foliar, a distribuição e a profundidade do sistema radicular e a própria relação entre sistema radicular e área foliar. De maneira simplista, ao comparar as plantas arbóreas com as herbáceas de ciclo anual, destaca-se que estas exploram um menor volume de solo em razão do pequeno desenvolvimento radicular em profundidade, por isso sofrem, com maior intensidade, os efeitos do deficit hídrico.

## Relações da água no sistema solo-planta-atmosfera

O manejo da água na agricultura exige um bom entendimento das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA), que engloba a caracterização dos processos que envolvem a água em equilíbrio e em movimento em todo o SSPA, constituindo-se de uma vasta área de conhecimento, porque os componentes solo, planta e atmosfera são estruturalmente bastante diferenciados entre si, com diversas formas de interação com a água. O entendimento de que o transporte de água deve ser estudado de uma forma global no SSPA ganhou ênfase nos anos 1960, quando físicos de solo e fisiologistas entenderam que esse transporte envolve um contínuo líquido e que ele depende inclusive das inter-relações entre os diferentes componentes. Já, nas décadas de 1930 e 1940, haviam sido lançadas ideias de se trabalhar com o sistema de forma integrada, as quais levaram Honert (1948) a propor um modelo em analogia com a Lei de Ohm de circuito elétrico, no qual o fluxo de água ocorre em equilíbrio dinâmico desde o solo até a atmosfera, sendo originado por diferenças de potenciais da água e dependente de resistências ao transporte em cada parte do sistema:

$$F = T = \frac{\Psi_{sr} - \Psi_s}{r_s} = \frac{\Psi_{ix} - \Psi_{sr}}{r_r} = \frac{\Psi_{fx} - \Psi_{ix}}{r_x} = \frac{\Psi_{se} - \Psi_{fx}}{r_f} = \frac{\Psi_{ar} - \Psi_{se}}{r_g} \quad (1)$$

em que  $F$  é o fluxo de água em equilíbrio dinâmico em todo o sistema, portanto equivalente ao fluxo de vapor perdido no processo da transpiração  $T$ ;  $\Psi_s, \Psi_{sr}, \Psi_{ix}, \Psi_{fx}, \Psi_{se}, \Psi_{ar}$  são, respectivamente, os potenciais da água do solo, do sistema radicular, dos pontos inicial e final do xilema, dos sítios de evaporação e do ar e  $r_s, r_r, r_x, r_f, r_g$  são, respectivamente, as resistências impostas ao fluxo pelo solo, pela raiz, pelo xilema, pela folha e pela fase gasosa.

Esse modelo, apesar de suas supersimplificações (ANGELOCCI, 2002), que o tornam mais um modelo didático primário do que aplicável na maioria das condições encontradas na prática, contribuiu para a consolidação do conceito de continuidade dos SSPAs e das noções bastante usadas atualmente, como as de resistências ao transporte e de potencial da água. O estudo das relações hídricas no SSPA é muito mais abrangente do que propõe um modelo desse tipo, mesmo porque muitas vezes o interesse específico concentra-se em estudos das relações hídricas nos níveis celular, de tecido ou de órgãos. Principalmente na planta, os processos envolvendo tanto água em equilíbrio como em movimento são peculiares à escala de estudo (célula, tecido e órgãos) e aos fatores atuantes nessa escala, de natureza biológica e física. Uma série de variáveis acaba sendo necessária nesses estudos e muitas vezes é característica da parte ou partes do SSPA de interesse. Nos itens seguintes, vários desses aspectos que interessam à irrigação serão discutidos, separando-se aqueles do solo ou da planta ou estudando-se as inter-relações deles, isoladas ou em conjunto, com a atmosfera.

Entre as variáveis usadas, aquelas caracterizadoras das condições hídricas de cada componente do SSPA são as fundamentais. Normalmente, elas envolvem a quantidade e o potencial da água. Este último tem sido muito usado após a proposta de sua adoção nos estudos de relações hídricas feitas por Gardner (1960) e Slatyer (1958), baseada nas justificativas de ser uma variável originária de um tratamento puramente físico, de ser aplicável em qualquer parte do sistema e de explicar os fluxos de água no SSPA, apesar das críticas feitas por Sinclair e Ludlow (1985). Por sua importância e aplicação generalizada nas relações hídricas no SSPA, suas bases físicas serão tratadas no próximo item. Sua aplicação específica às partes do SSPA será discutida nos itens pertinentes.

## O conceito de potencial químico da água

O potencial químico de uma substância é definido com base na energia livre para realizar trabalho líquido, empregando-se a termodinâmica de processos reversíveis. A energia livre de Gibbs ( $G$ ) é a função termodinâmica apropriada no caso, conforme discutido por Angelocci (2002).

O potencial químico da água ( $\mu_a$ ) representa a variação da energia livre de Gibbs em razão da variação do número de moles de água ( $n_a$ ), em um sistema mantido à temperatura, pressão e outros constituintes constantes, de modo que:

$$\mu_a = \left( \frac{\partial G}{\partial n_a} \right)_{T,P,n_i} \quad (2)$$

sendo expresso em energia livre por mol ( $\text{J mol}^{-1}$ ) no Sistema Internacional de Unidades (SI).

O valor absoluto do potencial da água é de difícil determinação, adotando-se um valor referencial ( $\mu_a^0$ ), de forma que o potencial  $\psi$  fica definido como

$$\psi = \mu_a - \mu_a^0 \quad (3)$$

O valor de  $\mu_a^0$  é definido como aquele da água pura e plana à temperatura e pressão atmosférica de um ponto em determinado referencial de posição (JONES, 1992; KOIDE et al., 1989). Dessa forma, o valor de  $\psi$  é zero quando num estado de água livre, plana e pura e decresce, assumindo valores negativos, quando ocorre a redução da energia livre da água em relação ao estado padrão.

O potencial da água pode ser expresso também em energia por unidade de massa de água ( $\text{J kg}^{-1}$ ), ou seja:

$$\psi = \frac{\mu_a - \mu_a^0}{M_a} \quad (4)$$

É comum expressá-lo também por unidade de volume molar da água ( $\bar{V}_a = 18,05 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ ):

$$\psi = \frac{\mu_a - \mu_a^0}{\bar{V}_a} \quad (5)$$

Essa relação equivale à grandeza física pressão  $P$ , pois:

$$P = \frac{E \times \text{mol}^{-1}}{V_a \times \text{mol}^{-1}} = \frac{E}{V_a} = \frac{E}{\rho \times g \times H} = \frac{E}{\rho \times M} = \frac{\psi}{\rho} \quad (\text{J} \times \text{m}^{-3} = \text{N} \times \text{m} \times \text{m}^{-3} = \text{Pa}) \quad (6)$$

em que  $\rho$  é a densidade da água ( $1.000 \text{ kgm}^{-3}$ ). Como  $1 \text{ Pa}$  representa uma unidade de pequena grandeza, considerando-se os valores encontrados no SSPA, normalmente são utilizados os seus múltiplos (hPa, kPa, MPa) ou em atm.

Uma última forma de expressá-lo por unidade de força-peso:

$$\psi = \frac{\mu_a - \mu_a^0}{\bar{V}_a} = \frac{\text{energia} \times \text{mol}^{-1}}{\text{força-peso} \times \text{mol}^{-1}} = \frac{m \times g \times H}{m \times g} = H \quad (7)$$

em que  $m$  é a massa de água,  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ ms}^{-2}$ ) e  $H$  a altura da coluna de água, ou seja, ele é expresso em metros de coluna de água (mca).

As relações entre grandezas de expressão de  $\psi$  são:

$$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} = 10,33 \text{ mca} = 101.300 \text{ Pa} = 101,3 \text{ kPa} = 0,1013 \text{ MPa}$$

Embora o potencial químico da água seja definido para condições constantes de temperatura, pressão e referencial de posição no campo gravitacional, o potencial total da água num sistema é afetado pela variação dessas grandezas, pela presença de solutos (efeito osmótico) e constituintes do sistema com os quais a água interage e pelos efeitos capilares, que diminuem a energia da água (efeito matricial, de maneira que o potencial total da água  $\psi$  é expresso por uma soma dos componentes parciais):

$$\psi = \psi_T + \psi_p + \psi_s + \psi_\tau + \psi_g \quad (8)$$

em que os subscritos referem-se aos componentes (e respectivos efeitos) de temperatura, pressão, solutos, matricial e gravitacional. A importância de cada termo e o seu significado no solo e na planta serão discutidos nos itens específicos.

## A água no solo

### Caracterização quantitativa: umidade e potencial da água

O solo é composto pelas frações sólida, gasosa e líquida, sendo comum a utilização do termo solo apenas para a sua parte sólida ou matriz. O termo água do solo é comumente utilizado para referir-se à solução do solo, em que as substâncias minerais e orgânicas se encontram dissolvidas na água, ou seja, a água é um dos seus componentes. Neste texto, o termo será usado sem distinção dos componentes água e solutos e será dada ênfase à condição de solo não saturado por ser essa a mais frequente nos sistemas de produção agrícola.

A quantidade de água no solo é comumente expressa por sua umidade, que se refere à massa ( $m_{ag}$ ) ou ao volume ( $V_{ag}$ ) de água por unidade de massa ( $m_s$ ), ou ao volume ( $V_s$ ) de solo seco:

$$U = \frac{m_{ag}}{m_s} = \frac{m_{atual} - m_s}{m_s} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{v_{ag}}{V_s} = \frac{V_{atual} - V_s}{V_s} \quad (10)$$

A umidade ( $U$ ) é expressa em kg de água por kg de solo seco e  $\theta$  em  $m^3$  de água por  $m^3$  de solo seco, podendo também ser expressas em valores percentuais. A relação entre elas é dada por:

$$\theta = U \times d_g \quad (11)$$

em que  $d_g$  é a densidade global do solo seco ( $kg\ m^{-3}$ ).

Os valores específicos de conteúdo de água que permitem a caracterização físico-hídrica de um solo são a umidade de saturação ( $U_s$  ou  $\theta_s$ ) e a umidade no ponto de capacidade de campo ( $U_{cc}$  ou  $\theta_{cc}$ ), no qual cessa a drenagem da água livre (água gravitacional) e se inicia a faixa de valores correspondentes à água retida no solo.

A água é retida à matriz do solo por meio das forças capilares e de adsorção. As forças capilares ocorrem nos microporos e estão associadas a uma interface água-ar, em que as moléculas de água são retidas por forças de coesão entre elas, maiores e contrárias às forças que as atraem para a fase gasosa. Isso gera a tensão superficial da água. As forças de adsorção podem ser representadas pelas forças de London-van der Waals entre as moléculas de água e a superfície sólida. A natureza bipolar das moléculas de água faz que elas sejam atraídas pelas cargas negativas presentes na superfície do solo. Assim, as forças capilares e de adsorção formam a força matricial, com a qual o solo retém a água, que interfere nos movimentos ascendente (evaporação, absorção pelas raízes e, indiretamente, transpiração) e descendente (distribuição e drenagem).

Logo após o final da drenagem de um solo saturado (poros cheios de água), as forças capilares tornam-se dominantes; no entanto, à medida que o solo seca, as forças de adsorção passam a predominar na retenção de água pelo solo.

A solução do solo apresenta solutos dissolvidos, o que torna a energia potencial ou energia livre dessa solução menor que a da água pura e livre. Como a energia cinética da solução do solo é desprezível, o seu estado de energia pode ser representado pela sua energia potencial e dividida a energia potencial por unidade de massa de água  $M$ , ou seja, o seu potencial  $\psi$  expresso pela equação 4.

O transporte da água no solo ocorre como resultado das diferenças desses potenciais, então, somente os componentes do potencial que variam com a posição do solo devem ser levados em consideração. Assim, o potencial total da água do solo ( $\psi_t$ ) pode ser representado pela soma de seus componentes:

$$\psi_t = \psi_p + \psi_g + \psi_o \quad \text{e} \quad \psi_p = \psi_m + \psi_a \quad (12)$$

em que os índices  $p$ ,  $g$ ,  $o$ ,  $m$  e  $a$  representam, respectivamente, os componentes pressão, gravitacional, osmótico, matricial e pneumático.

O potencial de pressão ( $\psi_p$ ) é decorrente da diferença da pressão da fase gasosa da água do solo para a pressão atmosférica, considerada como referência, e é geralmente julgado desprezível em solos insaturados, o que torna  $\psi_m = \psi_a$ . O potencial osmótico ( $\psi_o$ ) representa os efeitos dos íons na água do solo e deve ser levado em consideração na absorção pelas raízes e no transporte de água na forma gasosa. Quando os íons se movimentam livremente dissolvidos no componente água, o  $\psi_o$  é considerado o mesmo em qualquer ponto do solo, tornando-se desprezível. Dessa forma, o transporte da água do solo insaturado pode ser considerado, dependendo do chamado potencial hidráulico ( $\psi_H$ ), que representa a soma dos potenciais matricial e gravitacional:

$$\psi_H = \psi_m + \psi_g \quad (13)$$

Para as medidas realizadas com tensiômetros, é desejável utilizar unidades equivalentes de potenciais da água do solo, definidas como a carga hidráulica ou a altura de coluna de água, conforme a equação 6.

Assim, para qualquer ponto no sistema solo, o potencial gravitacional ( $\psi_g$ ) é equivalente à altura  $z$  na superfície do solo, arbitrariamente adotada como referencial, ou seja,  $\psi_g = z = 0$  na superfície e  $\psi_g = z$  na profundidade do solo considerada. O potencial de pressão ( $\psi_p$ ) é igual à altura acima de um determinado ponto, a uma profundidade  $z$ , em um solo em equilíbrio hidrostático com a superfície de água livre (solo saturado). Em um solo saturado,  $\psi_g$  e  $\psi_p$  são negativos, pois adotam-se valores negativos e positivos para valores abaixo e acima do nível de referência (superfície do solo).

Na ocasião do uso de tensiômetros com sensores digitais, pode ser conveniente utilizar a unidade equivalente do potencial da água obtida pela relação entre a energia potencial e a unidade de volume ( $V, m^3$ ), que equivale à grandeza física pressão (equação 6).

Mais detalhes sobre potenciais da água no solo podem ser obtidos em Dirksen (1999), Kutilek e Nielsen (1994), Libardi (1995) e Reichardt (1996).

## Fluxo de água no solo

O regime de escoamento de água no meio poroso pode ser caracterizado quanto: a) à estabilidade ou constância do fluxo, isto é, pelo regime permanente, no qual a variação do fluxo é nula com o tempo, e pelo regime variável, quando ocorrem mudanças do fluxo com o tempo; b) às condições de saturação, que podem ser saturadas e não saturadas, do meio no qual ocorre o regime de fluxo; c) à geometria do fluxo no meio, que está diretamente ligada ao sistema de irrigação.

As condições mais comumente encontradas nas regiões irrigadas são as de fluxo não saturado, em que os gradientes de potencial total da água do solo são relativos aos componentes de potencial matricial (tensão de água do solo) e à condutividade hidráulica do solo não saturada.

A equação de Darcy, concebida para uso em condição saturada, foi modificada por Buckingham (1907), citado por Or e Wraith (1997), para as condições de fluxo não saturado, e expressa o fluxo de água no meio poroso, segundo a equação:

$$J_w = -K(h) \frac{\partial H}{\partial z} = -K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (14)$$

em que  $J_w$  é a densidade de fluxo de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $K(h)$  a condutividade hidráulica não saturada ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $H$  o potencial total,  $h$  o potencial matricial e  $z$  o potencial gravitacional ou de posição.

A condutividade hidráulica  $K(h)$  ou  $K(\theta)$  pode ser definida como a capacidade que um solo tem de transmitir a água em seu interior. Assim, quando o solo se apresenta saturado (todos os poros cheios de água), o valor de  $K$  é máximo; à medida que  $\theta$  se reduz, menor será o valor de  $K$ . Desse modo, o principal fator de redução do fluxo de drenagem é  $K$ , e não o gradiente do potencial hidráulico. O sinal negativo da equação de Darcy indica o fluxo de água, que atua sempre no sentido contrário ao do gradiente hidráulico, ou seja, do maior potencial (maior valor de umidade) para o menor potencial (menor valor de umidade), na tendência de estabelecer o equilíbrio do sistema solo-água. Em condições de irrigação por aspersão ou localizada, os gradientes de potencial são devidos principalmente a componente do potencial gravitacional, uma vez que não ocorre formação de lâmina d'água na superfície do solo, ou se ocorre, é insignificante.

## Infiltração da água no solo

Uma vez aplicada ao solo via irrigação, a água infiltrará e passará por um processo de redistribuição, movimentando-se em direções e sentidos diversos, tendendo a equilibrar as diferenças de potenciais existentes, sendo esses movimentos resultantes das forças matriciais e gravitacionais. Parte dessa água movimentar-se-á no sentido vertical para cima, em resposta à diferença de potencial com a atmosfera, ou percolará pela predominância de forças gravitacionais, e parte será simultaneamente absorvida pelo sistema radicular.

A infiltração nas condições de fluxo unidimensional predominante, como é o caso da irrigação por aspersão, pode ser representada pela equação empírica de Lewis-Kostiakov:

$$I = kt^a; \quad i = \frac{dI}{dt} = a \times k \times t^{a-1} \quad (15)$$

em que  $I$  é a infiltração acumulada,  $t$  o tempo decorrido desde o início do processo,  $a$  e  $k$  são parâmetros empíricos e  $i = dI/dt$  é a taxa de infiltração. Essa equação não leva em conta a umidade inicial do solo e requer a inclusão de outro parâmetro ( $f_0$ ) para representar a infiltração durante longo período de tempo, cuja infiltração acumulada fica da forma  $I = kt^a + f_0$  e a velocidade de infiltração fica  $i = akt^{a-1} + f_0$ .

A infiltração por irrigação pode ser representada matematicamente pela equação de Green-Ampt a partir de uma transformação da equação de Darcy, considerando-se  $\psi_i$  o potencial matricial inicial do solo,  $L$  o comprimento da frente de umidade,  $d$  a lâmina de água sobre a superfície do solo,  $h_e$  a porosidade efetiva do solo ou a porosidade disponível para ser preenchida com água. Assume-se uma frente de umidade abrupta, com o solo saturado em busca da frente de umidade e sem presença de ar preso nos poros dele. Assim, a partir da conservação da massa e da equação de Darcy, pode-se obter uma forma da equação de Green-Ampt:

$$I = K_s \left( 1 - \frac{\Psi_i \times \eta e}{100i} \right) \quad (16)$$

A equação é de caráter físico e, portanto, tem uma grande vantagem para poder prever a grandeza. A forma da curva de infiltração de água de um solo ajuda a explicar fisicamente a infiltração, por exemplo, quanto maior o valor de  $I$ , menor será o valor de  $i$ . Contudo, apresenta desvantagens no que se refere à calibração dos parâmetros e uso em solos estratificados.

A infiltração no caso da irrigação localizada não é unidimensional, mas multidimensional, quando a água infiltra em diferentes direções no solo. A representação matemática da infiltração nesse caso torna-se mais difícil. Uma solução aproximada, considerando-se infiltração constante foi proposta por Wooding (1968):

$$i_f = K_s + \frac{4K_s}{\pi \times r_s \times \beta} \quad (17)$$

em que  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada e  $r_s$  o raio da poça de água formada abaixo do emissor,  $\beta$  é dado por:

$$\beta = \frac{(\theta_f - \theta_i)K_s}{b \times S^2} \quad (18)$$

sendo  $\theta_f$  a umidade média do solo no final do teste de infiltração, quando a velocidade de infiltração se mantém constante,  $\theta_i$  a umidade do solo antes de a infiltração ocorrer,  $b$  um parâmetro de forma, podendo ser adotado o valor de 0,55, e  $S$  obtido da declividade da equação de Philip,  $I = St^{1/2}$ , válida para o início do processo de infiltração.

## Distribuição de água no solo sob irrigação

Nas condições de irrigação por aspersão, o movimento de água no perfil do solo ocorre predominantemente na direção vertical, sendo seu sentido descendente durante o processo de infiltração, isto é, durante a irrigação é ascendente em razão dos gradientes de potencial resultantes da evaporação do solo e da transpiração das plantas. A equação que pode representar os processos de infiltração, redistribuição e evaporação é do tipo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (19)$$

em que  $K(\theta)$  indica condutividade hidráulica não saturada,  $H$  potencial total de água no solo e  $H = h + z$ , sendo  $h$  o potencial matricial e  $z$  o potencial gravitacional.

Essa equação indica que qualquer mudança no teor de água, com o tempo, equivale a uma variação no fluxo vertical de água  $\partial q / \partial z$ .

Na irrigação localizada, a distribuição de água ocorre a partir da fonte ou do emissor, difundindo-se em todas as direções no solo. Se os emissores estão

distanciados de forma a não haver sobreposição dos bulbos ou volumes molhados, tem-se uma situação de ponto fonte. No caso de os emissores serem distanciados de forma a haver sobreposição dos volumes molhados, tem-se uma situação de linha fonte, que é muito comum em irrigação por gotejamento. No primeiro caso, a representação do fluxo de água no solo é feita considerando-se um emissor (ponto fonte) sobre um elemento cilíndrico de solo, de raio  $r$ , em que o eixo vertical  $Z$  do cilindro passa no emissor, sendo o solo uniforme, com simetria radial de distribuição de água a partir do emissor. A equação do fluxo de água em coordenadas cilíndricas será:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{K(\theta)}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (20)$$

em que a primeira parcela do lado direito da equação representa a componente do fluxo na direção radial e a segunda parcela representa a componente do fluxo na direção vertical. No caso da linha fonte, considera-se uniforme a distribuição de água no sentido da linha de emissores, sendo a variação predominante do fluxo de água no plano transversal à direção da linha de emissores, onde se aplicam as coordenadas retangulares, sendo  $x$  a distância do emissor e  $z$  a profundidade em relação à superfície do solo. A equação do fluxo de água no solo fica desta forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (21)$$

As formas generalizadas dessas equações, incluindo a extração de água pelo sistema radicular das culturas, provêm de uma conotação mais realista ao uso desses modelos matemáticos de representação da dinâmica de água no solo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [K(\theta) \nabla H] - S \quad (22)$$

sendo  $\nabla$  o operador gradiente e  $S$  a extração de água do solo pelo sistema radicular, que equivale à transpiração das plantas. Nessas equações, o efeito da evaporação é praticamente desprezível, uma vez que ela é, em geral, inferior à condutividade hidráulica saturada do solo ( $1 \text{ mm h}^{-1}$  a  $10 \text{ mm h}^{-1}$ ). As equações diferenciais citadas, derivadas da equação de Richards, podem ser solucionadas de forma analítica ou numérica.

## Soluções analíticas de escoamento da água no solo

As soluções analíticas apresentam a vantagem de serem diretas, isto é, entra-se com os parâmetros das equações e obtêm-se automaticamente os resultados, com um número de parâmetros de entrada das equações pequeno. No caso da irrigação localizada, a distribuição de água no volume molhado gerado pelo gotejamento pode ser obtida considerando-se tanto o escoamento permanente, como o escoamento variável no solo. O escoamento permanente corresponderia, em termos práticos, a uma condição de predominância do processo de infiltração, durante e entre irrigações, em relação à redistribuição, evaporação e extração de água (BRESLER, 1978). No caso de escoamento permanente ( $\partial\theta/\partial t = 0$ ), podem-se obter soluções das equações citadas. Mas, em condições de campo, em condições de irrigação diária ou de menor frequência, o escoamento de água no solo é variável, conforme mostrado por Coelho e Or (1996) em razão, principalmente, da atividade do sistema radicular.

A equação multidimensional de Richards, que governa o fluxo não saturado no meio poroso, pode ser linearizada usando a transformação de Kirchoff ( $\phi$ ), apresentada por Philip (1971):

$$\phi = \int_{-\infty}^h K(h) dh = \frac{K(h)}{\alpha} \quad (23)$$

em que  $K(h)$  é a condutividade hidráulica não saturada ( $LT^{-1}$ ) e  $\alpha$  a constante característica do solo ( $L^{-1}$ ). A condutividade hidráulica não saturada  $K(h)$  pode ser obtida pelo modelo exponencial proposto por Gardner (1958):

$$K(h) = K_s x e^{\alpha h} \quad (24)$$

sendo  $K_s$  a condutividade hidráulica saturada e  $\alpha$  o parâmetro relacionado à sorptividade do meio poroso e representa a taxa de redução na condutividade hidráulica com a redução do potencial matricial ( $L^{-1}$ ). Warrick (1974) usou as equações 23 e 24 associadas à condição  $dK/d\theta = k$ , sendo  $k$  constante para linearizar a equação da continuidade ou de Richards em termo de  $\phi$ :

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{k}{\alpha} \nabla^2 \phi - k \frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (25)$$

em que  $k$  pode ser obtido conforme metodologias sugeridas por Ben-Asher et al. (1978).

Warrick (1974) introduziu as variáveis adimensionais  $R = \alpha r/2$ ,  $Z = \alpha z/2$ ,  $T = \alpha kt/4$ ,  $\rho = (R^2 + Z^2)^{1/2}$  e  $\Phi = 8\phi\pi/\alpha q$  para solucionar a equação 25 analiticamente sujeita à condição inicial  $\phi(r, z, 0) = 0$  e à condição de contorno  $(\partial\phi/\partial z) + \partial\phi = 0$  em  $z = 0$ ,  $r \neq 0$ . A solução, considerando-se ponto fonte abaixo da superfície do solo (exemplo: gotejador enterrado), pode ser dada por:

$$\Phi_B(R, Z, T) = \frac{e^Z}{2\rho} \left\{ e^\rho \operatorname{erf} \left( \frac{\rho}{2\sqrt{T}} + \sqrt{T} \right) + e^{-\rho} \operatorname{erf} \left( \frac{\rho}{2\sqrt{T}} - \sqrt{T} \right) \right\} \quad (26)$$

e a solução, considerando-se ponto fonte à superfície do solo:

$$\Phi(R, Z, T) = 2 \left\{ \Phi_B - e^{2Z} \int_Z^\infty e^{-2Z'} [\Phi_B]_{Z=Z'} dZ' \right\} \quad (27)$$

em que a integral da equação 27 pode ser resolvida usando-se a fórmula de 15 pontos de Gauss-Laguerre, com  $Z' = Z + x/2$  (SEN et al., 1992), sendo a solução dada pela expressão:

$$\int_Z^\infty e^{-2Z'} [\Phi_B]_{Z=Z'} dZ' = e^{-2Z} \int_0^\infty e^{-x} [\Phi_B]_{Z'=Z+\frac{x}{2}} \frac{dx}{2} = \frac{1}{2} e^{-2Z} \sum_{i=0}^n \omega_i [\Phi_B]_{Z'=Z+\frac{x}{2}} \quad (28)$$

em que  $\omega_i$ , que representa um fator de ponderação (peso) em cada ponto de Gauss-Laguerre ( $x$ ), pode ser determinado conforme Carnahan et al. (1969).

A distribuição de  $\phi(r, z, t)$  ao longo do tempo, simulando-se infiltração e redistribuição de água durante e após a irrigação, pode ser obtida da superposição das soluções apresentadas, uma vez que são lineares, gerando a seguinte expressão:

$$\phi(R, Z, T) = \frac{\alpha}{8\pi} \sum_{i=0}^n (q_i - q_{i-1}) \Phi(R, Z, T - T_i) \quad (29)$$

sendo  $q_{i-1} = 0$ ,  $T_0 = 0$  e  $T > T_n$ .

No caso de emissão de água em linha (linha fonte) enterrada, Lomen e Warrick (1974) obtiveram a seguinte solução para a equação 29:

$$\Phi_B(X, Z, T) = \frac{e^Z}{2} \int_0^\infty \xi^{-1} \exp \left[ -\xi - (X^2 + Z^2)/4\xi \right] d\xi \quad (30)$$

em que  $X = \alpha x/2$ ,  $\phi = q\phi_B/2\pi$  e  $\xi$  é uma variável auxiliar que representa o tempo adimensional. A solução da integral da equação 30 pode ser obtida usando-se a fórmula de Gauss-Legendre cinco pontos:

$$\int_0^T \xi^{-1} \exp\left[-\xi - (X^2 + Z^2)/4\xi\right] d\xi = \frac{T}{2} \sum_{i=0}^4 w_i f\left(\frac{z_i T + T}{2}\right) \quad (31)$$

em que  $w_i$  e  $z_i$  são apresentados conforme Carnahan et al. (1969).

Tendo as soluções para distribuição de  $f$  num plano bidimensional, o valor do potencial matricial numa certa posição  $h(r, z, t)$  do bulbo molhado pode ser determinado usando-se a transformação:

$$h(r, z, t) = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{\alpha \times \phi(r, z, t)}{K_s} \right] \quad (32)$$

O valor da umidade  $\theta(r, z, t)$  pode ser obtido usando-se  $h(r, z, t)$  em qualquer modelo de retenção de umidade disponível, como o de Genuchten (1980). O único problema em se usar o modelo de Genuchten (1980) no caso é que o valor de  $\alpha$  ajustado pode ser diferente do valor usado nas equações anteriores. Assim, recomenda-se numa primeira instância usar o modelo de Russo (1988) abaixo para manter consistência nos valores de  $\alpha$ :

$$\theta = [e^{0,5\alpha h} (1 - 0,5\alpha \times h)]^{0,8} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (33)$$

Dessa forma, a distribuição de água no bulbo molhado pode ser determinada tanto durante o processo de infiltração decorrente da aplicação de água pelo emissor, como durante a fase de redistribuição de água entre o fim de uma irrigação e o início da próxima.

## Soluções numéricas de escoamento da água no solo

A não linearidade da equação de Richards deve-se principalmente à dependência da condutividade hidráulica da umidade ou do potencial de água do solo. A solução numérica torna-se assim mais realista, apesar do caráter mais complexo que as soluções analíticas.

Os métodos numéricos mais usados para desenvolvimento e solução dessas equações diferenciais de fluxo de água no solo são os da diferença finita e do elemento finito. Para qualquer método usado, três etapas são necessárias: a) discretização do domínio do fluxo; b) discretização das equações diferenciais parciais em uma série de diferenças ou integrações aproximadas, uma para cada ponto espacial dentro da malha de pontos gerada; c) formulação do problema em código computacional de forma a promover a solução simultânea de todas as equa-

ções em todos os pontos do domínio de fluxo, em sucessivos intervalos de tempo (OR; WRAIT, 1997). A solução das equações diferenciais, tanto para fluxo unidimensional como para fluxo bidimensional, tem sido encontrada usando-se diferença finita (BRANDT et al., 1971; LAFOLIE et al., 1989) e também elemento finito (SIMUNEK et al., 1993; TAGHAVI et al., 1984). O uso do elemento finito tem sido preferido principalmente em caso de fluxo multidimensional, em meio heterogêneo com fronteiras ou bordas irregulares. Avaliações dos métodos numéricos têm sido feitas em laboratório e em campo (RUSSO, 1975) com desempenho satisfatório.

## Estimativa do volume molhado do solo sob irrigação localizada

A definição dos padrões de distribuição de água pelos emissores em irrigação localizada constitui-se em importante informação para projetos de irrigação, principalmente na definição do espaçamento entre emissores. O uso de métodos analíticos ou numéricos para avaliação de distribuição de água no solo não é de fácil acesso aos usuários, que muitas vezes não dispõem das informações necessárias para execução desses processos. A disponibilidade de métodos que permitam uma visão global do volume molhado facilita ao usuário a aplicação dessas informações na elaboração de projeto de irrigação e no manejo da irrigação em si.

A maneira mais simples de tratar o volume molhado do solo irrigado por gotejamento é por meio de uma semiesfera, cujo raio, a partir do início da irrigação, pode ser representado pela seguinte equação:

$$r(t) = \left[ \frac{3q \times t}{2\pi \Delta\theta} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

em que  $q$  é a vazão do emissor ( $L^3 T^{-1}$ ),  $t$  o tempo de irrigação ( $T$ ) e  $\Delta\theta$  a variação da umidade média dentro do volume molhado. A validade dessa equação está condicionada a solos argilosos, inicialmente secos, nos períodos iniciais da irrigação. À medida que o tempo de irrigação transcorre, o efeito da gravidade tende a mudar a forma do bulbo molhado, de esférica para semi-elipse.

Schwartzman e Zur (1985) propuseram as seguintes equações para estimativa da profundidade ( $z$ ), diâmetro ( $d$ ) e volume do solo molhado ( $V$ ) com condutividade hidráulica saturada  $K_s$  durante a irrigação, a partir de um gotejador superficial de vazão  $q$ :

$$z = 2,54V^{0,63} \left( \frac{K_s}{q} \right)^{0,45} \quad (35)$$

$$d = 1,82V^{0,22} \left( \frac{K_s}{q} \right)^{-0,17} \quad (36)$$

$$d = 1,32z^{0,35} \left( \frac{q}{K_s} \right)^{0,33} \approx 1,32 \left( \frac{z \times q}{K_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (37)$$

em que as variáveis envolvidas devem ter unidades coerentes, como  $d$  e  $z$  em metro,  $q$  em  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ,  $K_s$  em  $\text{m s}^{-1}$  e  $V$  em  $\text{m}^3$ .

Outras equações têm sido propostas para estimativa das dimensões do volume molhado com maior ou menor facilidade de uso. Entre essas proposições, pode-se citar a equação generalizada da forma do volume molhado citada por Healy e Warrick (1988), que usa coeficientes empíricos resultantes de solução numérica da forma adimensional da equação de Richards. Risse e Chesness (1989) também propuseram um método de estimar o raio do volume molhado do solo resultante de um gotejador superficial, a partir do conhecimento da textura do solo, da vazão do emissor e da redução do potencial de água do solo.

## Distribuição radicular e absorção da água do solo

A distribuição de raízes de espécies frutíferas varia de acordo com a origem da muda, tipo de solo e manejo da cultura. Assim, plantas oriundas de sementes apresentam uma raiz pivotante, enquanto as propagadas assexuadamente apresentam um sistema radicular fasciculado, com maior distribuição de raízes laterais (CARVALHO, 2002). Espécies olerícolas transplantadas com torrão permitem a formação de um sistema radicular mais estreito e profundo, quando comparadas às plantas originadas de transplante de raiz nua, que possibilitam a formação de um sistema radicular mais raso, fibroso e mais largo (SALLES, 2002). A profundidade, textura, estrutura, pH, condutividade elétrica e disponibilidade de nutrientes influenciam a distribuição das raízes no solo. Desde que as raízes estejam na mesma porção do solo onde se encontram os nutrientes, pode ocorrer a interceptação radicular que contribui para o processo de absorção. Ressalte-se também que a umidade do solo desempenha um papel importante na absorção de nutrientes, pela forte dependência do fluxo de massa e da difusão da umidade do solo e pelo

fato de as raízes crescerem e proliferarem em maior densidade em condições adequadas de nutrientes e umidade para cada espécie.

Para a prática da fertirrigação, essas informações são importantes, pois, conhecendo a umidade do solo nas diversas profundidades e a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura em questão, pode-se monitorar a frente de molhamento de uma fertirrigação em diversas profundidades do solo. Isso pode ser feito instalando-se tensiômetros em diversas profundidades dentro da profundidade efetiva do sistema radicular (80% da sua profundidade total). O fracionamento da aplicação de água e nutrientes pode ser feito levando-se em consideração a textura do solo, visando proporcionar um maior umedecimento da zona radicular e minimizar a lixiviação de nutrientes para as camadas mais profundas do solo. A Tabela 1 mostra a profundidade efetiva das raízes de algumas fruteiras e olerícolas.

Outra possibilidade é o uso de extratores de solução do solo, que são instalados também na zona radicular para o monitoramento da concentração de determinado íon, do pH e da condutividade elétrica no sistema solo-água. Os extratores podem ser instalados na profundidade efetiva e abaixo da zona radicular, de modo a verificar, por meio da comparação de concentrações dos íons, se está ocorrendo a lixiviação de nutrientes. O movimento de nitrato, potássio, cálcio e magnésio no solo apresenta estreita relação com o fluxo de água no solo (BASSOI; CARVALHO, 1992; BASSOI; REICHARDT, 1995; SOUSA, 2000). Para ter mais velocidade, há necessidade de se determinar a concentração com testes rápidos, devidamente calibrados para o nutriente (íon) de interesse.

A água do solo move-se através dos solos predominantemente por fluxo de massa, governado por um gradiente de pressão. A difusão do vapor de água ocorre em uma escala muito menor dentro do movimento total de água no solo. À medida que as plantas absorvem água do solo, elas esgotam o solo de água junto à superfície das raízes, que leva a uma redução de  $K$  e do potencial hidráulico ( $\psi_H$ ) da água junto à raiz e, conseqüentemente, ao surgimento de um gradiente desse potencial em relação às regiões vizinhas do solo, que possuem maiores valores de  $\psi_H$ .

Um contato íntimo entre a superfície radicular e o solo torna-se essencial para a absorção efetiva das raízes. Esse contato proporciona a área de superfície necessária para a absorção de água e é maximizado pelo crescimento das raízes,

**Tabela 1.** Profundidade do sistema radicular de algumas espécies frutíferas e oleícolas irrigadas.

Cultura	Sistema de irrigação	Espaçamento (plantas x linhas) (m)	Solo <sup>(1)</sup>	Profundidade efetiva das raízes (m)	Distância horizontal das raízes (m)
Abacateiro <sup>(2)</sup>	-	8 x 9	AVA	1,50	1,50
Aceroleira <sup>(3)</sup>	-	2 x 4	LR distrófico	0,50 a 0,70	0,75
Aspargo <sup>(4)</sup>	Aspersão convencional	2,3 x 0,4	LVA textura média	0,60	0,60
Bananeira <sup>(5)</sup>	Microaspersão	3 x 3	LVA textura média	0,60	0,60
Citrus <sup>(6), (7)</sup>	Microaspersão	7 x 8	TER	0,60	2,00
	Microaspersão	5 x 7	LVA textura arenosa	0,60	2,00
Coqueiro <sup>(8), (9)</sup>	-	-	AQ distrófica	0,60	1,50
	Microaspersão	7,5 x 7,5	NQ	0,60	2,40
Goiabeira <sup>(10)</sup>	Microaspersão	5 x 6	LVA textura média	0,80	0,80
Mamoeiro <sup>(11)</sup>	Gotejamento	-	Textura franco-argilo-arenosa	0,45	0,60
	Gotejamento enterrado	-		0,25	0,45
	Microaspersão	-		0,35	0,80
Mangueira <sup>(12), (13), (14)</sup>	Gotejamento	5 x 8	LVA textura média	0,90	1,60
	Microaspersão	7 x 9	LVA textura arenosa	0,60	2,00
	Microaspersão	10 x 10	TER	0,80	2,50
Maracujazeiro <sup>(15)</sup>	Gotejamento	3,5 x 4	TER	0,40	-
Melanciaira <sup>(16)</sup>	-	0,8 x 3,5	LVA	0,25	-
Pupunha <sup>(17), (18)</sup>	Sulco	1 x 2	LVA textura média,	0,40	0,80
	Gotejamento	1 x 2	Vertissolo	0,40	1,00
Tamareira <sup>(19)</sup>	Sulco	4 x 5	LVA textura média	0,80	-
Tomateiro <sup>(20)</sup>	-	0,35	LVA	0,35	-
Videira <sup>(21), (22)</sup>	Gotejamento e microaspersão	2 x 4	LVA textura média	0,40	0,60
	Microaspersão	3 x 3,5	Textura arenosa	0,60	0,60

<sup>(1)</sup> AVA: Argissolo Vermelho Amarelo; LR: Latossolo Roxo; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; TER: Nitossolo; AQ: Areia Quartzosa; NQ: Neossolo Quartzarênico.

Fonte: <sup>(2)</sup> Correa (1982); <sup>(3)</sup> Neves et al. (2001); <sup>(4)</sup> Bassoi et al. (2001); <sup>(5)</sup> Bassoi et al. (2002a); <sup>(6)</sup> Machado (2000); <sup>(7)</sup> Coelho et al. (2002); <sup>(8)</sup> Cintra et al. (1992); <sup>(9)</sup> Santos et al. (2003); <sup>(10)</sup> Bassoi et al. (2002b); <sup>(11)</sup> Coelho et al. (2003); <sup>(12)</sup> Silva et al. (2001); <sup>(13)</sup> Coelho et al. (2001); <sup>(14)</sup> Silva et al. (1999); <sup>(15)</sup> Sousa et al. (2002); <sup>(16)</sup> Choudhury et al. (1986); <sup>(17)</sup> Bassoi et al. (1999); <sup>(18)</sup> Bassoi et al. (2003a); <sup>(19)</sup> Bassoi et al. (1998); <sup>(20)</sup> Choudhury et al. (1980); <sup>(21)</sup> Bassoi et al. (2001); <sup>(22)</sup> Bassoi et al. (2003b).

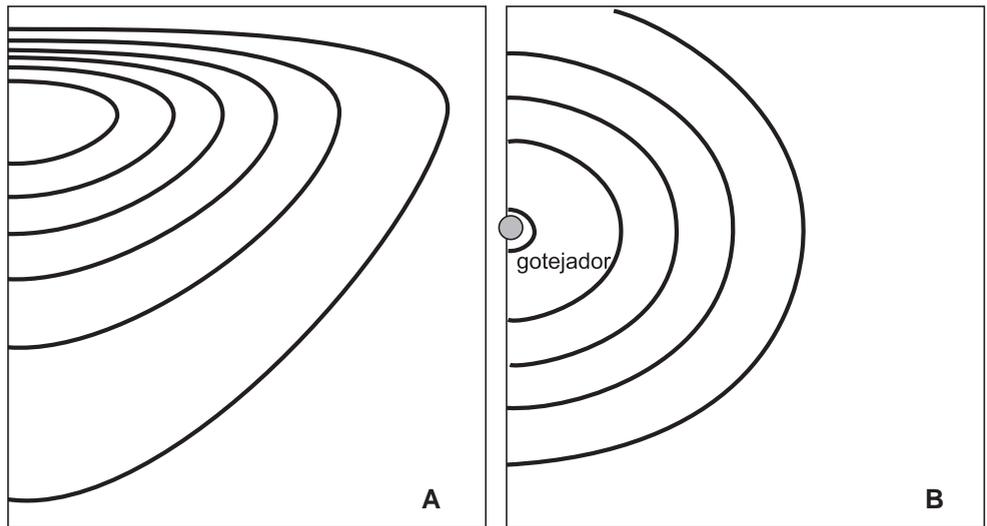
cuja presença de pelos radiculares aumenta significativamente tal contato (TAIZ; ZEIGER, 1998).

A consideração das regiões de absorção de água pelas raízes é importante tanto na irrigação por aspersão quanto na irrigação localizada. Os cálculos das quantidades de água a serem aplicadas às culturas levam em conta a profundidade efetiva do sistema radicular e essa profundidade, por sua vez, deve estar relacionada à zona do perfil do solo de maior atividade de extração de água do sistema radicular. Na irrigação localizada, o conhecimento da região de atividade efetiva de extração de água permite instalar melhor os emissores de água, de forma que a irrigação atenda às regiões efetivamente extratoras do sistema radicular. O conhecimento das zonas de absorção efetiva de água do sistema radicular é importante para nortear as adubações com fertilizantes sólidos, uma vez que eles devem ser aplicados à superfície do solo, sobre essas regiões efetivas de absorção de água. Há ainda a questão do monitoramento da irrigação por meio de sensores de água do solo, que devem ser instalados nas zonas de maior atividade do sistema radicular.

Os modelos de absorção de água no solo devem refletir as condições de campo. Muito poucos estudos têm sido realizados com o fim de representar matematicamente a extração de água na zona radicular, principalmente em condição de fluxo multidimensional, tal como ocorre na irrigação localizada. Muitas das propostas existentes tendem a relacionar as zonas de extração de água às zonas de maior disponibilidade de água no solo (NEUMAN et al., 1975; PHILIP, 1991; WARRICK et al., 1980).

Coelho e Or (1996) propuseram modelos paramétricos para representar a extração de água no perfil do solo irrigado por gotejamento, baseados em funções de densidade de probabilidade Gaussianas de duas variáveis, em conformidade com diferentes distribuições de água no solo, esperadas de acordo com a posição da planta e do gotejador. No caso, assume-se que a região onde a extração de água ocorre é função principalmente da posição do gotejador em relação à posição da planta, e da presença de interfaces de extração nula, tais como, a superfície do solo e as regiões do bulbo molhado onde as tensões de umidade são superiores à capacidade de absorção pelas raízes. A Figura 1 ilustra duas configurações comumente esperadas em condições de campo para o caso do gotejador à superfície do solo (Figura 1a) ou enterrado (Figura 1b) próximo do caule da planta. No primeiro caso (Figura 1a), o modelo Gaussiano semilogarítmico pode ser usado para descrever a distribuição da extração de água:

● gotejador



**Figura 1.** Configurações comumente esperadas em condições de campo para o caso do gotejador à superfície do solo (A) ou enterrado (B).

$$u(r,z) = \frac{\beta}{2\pi s_r \times S_z \times z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(r - m_r)^2}{s_r^2} + \frac{(\ln(z) - M_z)^2}{S_z^2} \right] \right\} \quad (38)$$

Considerando-se o gotejador ou emissor enterrado, o modelo Gaussiano normal pode representar a distribuição da extração de água:

$$u(r,z) = \frac{\beta}{2\pi s_r \times s_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(r - m_r)^2}{s_r^2} + \frac{(z - m_z)^2}{s_z^2} \right] \right\} \quad (39)$$

em que  $u(r, z)$  corresponde à fração de água extraída numa certa posição  $(r, z)$  do bulbo molhado em relação ao total de água extraída no plano;  $m_r$  e  $s_r$  são as médias e desvio-padrão, respectivamente, da distribuição de extração de água na direção radial e  $M_z$  e  $S_z$  são a média e desvio-padrão, respectivamente, referentes à coordenada transformada  $\ln(z)$  e  $\beta$  é um parâmetro de escala.

Os parâmetros  $m_r, s_r, M_z, S_z$  e  $\beta$  são determinados por um processo de otimização em que a função objetiva representa o somatório do quadrado dos desvios entre os valores estimados pelo modelo de extração e os dados observados, sendo as variáveis os parâmetros dos modelos. Esses modelos paramétricos devem ser calibrados para cada cultura e os seus parâmetros variarão principalmente conforme o manejo de irrigação e a idade da cultura.

## Balanço de água localizada no perfil do solo para estimativa da umidade

A quantidade de água extraída numa posição  $(r, z)$  no modelo proposto pode ser obtida a partir da evapotranspiração diária da cultura  $E_t$  e da área  $(A)$  sobre a superfície do solo correspondente ao plano perpendicular à direção da linha lateral de gotejamento. Nesse caso as perdas por percolação e evaporação não são consideradas. A transpiração diária  $(T = A \times E_t)$  no plano é convertida na transpiração numa posição  $(r, z)$  por meio do produto dela pelo valor de  $u(r, z)$  ou  $T'(r, z) = T \times u(r, z)$ , em unidades de umidade volumétrica  $(L^3 L^{-3} T^{-1})$ . Numa escala horária, a transpiração  $\tau(r, z, t)$  pode ser dada pela equação:

$$\tau(t) = \frac{T \sin^4(\omega t)}{\int_0^{24} \sin^4(\omega t)} \quad (40)$$

em que  $\omega = 2\pi/P$ , sendo  $P$  o período considerado, e  $t$  o tempo atual (0–24 h).

A umidade na posição  $(r, z)$ , num plano radial ao caule e ao gotejador,  $\theta(r, z, t)$ , será dada como resultado do balanço de água na posição  $(r, z)$  num dado tempo, levando em conta que os componentes do balanço são a umidade  $\theta_f(r, z, t)$  resultante da infiltração e redistribuição de água (equação 16) e a extração de água pelas raízes acumulada naquela posição desde o fim da última irrigação  $t_0$ , ou  $\Delta\theta_\tau(r, z, t - t_0)$ , em que:

$$\Delta\theta_\tau(r, z, t) = \int_{t_0}^t \tau(r, z, t) dt \quad (41)$$

Assim, ao fim de cada irrigação, considera-se que o deficit de água é suprido pela irrigação, fazendo  $\Delta\theta_\tau(r, z, t_0) = 0$ ;  $\theta(r, z, t)$  ou a umidade atual será dada pela equação:

$$\theta(r, z, t) = \theta_f(r, z, t) - \Delta\theta_\tau(r, z, t - t_0) \quad (42)$$

## A água na planta – transpiração

### Caracterização quantitativa das condições hídricas das plantas

O estado hídrico das plantas pode ser caracterizado pelas medidas quantitativas do conteúdo de água em órgãos vegetais ou pela determinação do potencial to-

tal da água ( $\psi$ ). Indicadores quantitativos indiretos, como sintomas visuais (secamento ou enrolamento das folhas, temperatura da folhagem e variação da condutância foliar à difusão de vapor), e variações micromorfológicas de órgãos, como caules, troncos e folhas, têm sido também usados e serão discutidos em item específico.

O conteúdo relativo de água e o potencial da água das folhas têm sido os indicadores quantitativos usados no estudo de relações hídricas em plantas, pela importância da folha como sede da fotossíntese e da transpiração e pela maior facilidade metodológica ao se trabalhar com esse órgão vegetal. Apesar de muitos considerarem ser o conteúdo relativo de água (*CRA*) melhor correlacionado com os processos fisiológicos das plantas, visto que está relacionado com a variação de volume celular, que é relevante no metabolismo de plantas sob déficit hídrico (JONES, 1992), o potencial da água é o indicador mais usado por ter como base princípios termodinâmicos e pela vantagem de ser aplicável em qualquer parte do sistema solo-planta-atmosfera, permitindo o seu uso e o estudo integrado do sistema. Outro aspecto que favorece o uso do potencial da água é a maior facilidade metodológica atualmente existente para sua determinação, quando comparada com a determinação do conteúdo relativo de água.

O conteúdo relativo de água de uma folha é expresso por:

$$CRA \% = \frac{100(m_a - m_s)}{(m_t - m_s)} \quad (43)$$

em que  $m_a$  é a massa da amostra quando retirada (massa “fresca” ou “atual”),  $m_s$  corresponde à massa seca e  $m_t$  à massa na turgescência plena.

Um dos problemas metodológicos no uso do *CRA* está relacionado à determinação de  $m_t$ , que é obtido após se forçar a saturação da folha inteira ou de discos de folhas (o uso destes últimos é preferível, pois requer menor tempo para saturação). Em virtude do crescimento do tecido durante a saturação, ocorre uma absorção de volume de água maior do que aquela que ocorreria se a absorção durante a saturação correspondesse somente à eliminação do déficit hídrico do tecido. Outro problema que pode ocorrer é o ganho ou a perda de massa por causa do balanço entre a respiração e a fotossíntese, sendo adequado, para a maior confiabilidade dos resultados, que o processo de saturação seja realizado em condições de ponto de compensação luminosa. Detalhes dessas fontes de erros podem ser encontrados em Barrs (1965) e Slavik (1975).

As dificuldades metodológicas, a laboriosidade e o tempo envolvido na determinação, a pequena faixa de variação dos valores entre a turgescência plena e a perda da turgescência e a sua aplicação somente em folhas fazem que o *CRA* venha sendo menos usado do que o potencial da água como caracterizador das condições hídricas das plantas (ANGELOCCI, 2002).

O potencial da água, definido em termo de potencial químico ( $\mu_w$ ), e sua aplicação ao solo foram discutidos anteriormente. Para sua aplicação em plantas, é conveniente definir a estrutura dos órgãos vegetais como sendo composta por dois compartimentos separados pela plasmalema, sendo o interno às membranas denominado de simplasto e o externo, de apoplasto. Cada um dos compartimentos pode ser considerado um sistema contínuo em cada órgão, pois as células possuem pontos de passagem entre elas para constituir o simplasto, enquanto o apoplasto é formado por paredes celulares e todo o sistema de transporte de água e solutos externo às células. Além disso, os compartimentos possuem interação entre si, sendo os processos de trocas de água e solutos regulados pela presença da plasmalema. Esses conceitos permitem reconhecer que a água localizada em cada compartimento fica afetada por fatores específicos de cada um deles, como ocorre, por exemplo, com o potencial da água.

Conforme já abordado, o potencial químico da água é afetado por uma série de variáveis. O efeito da temperatura no potencial da água da planta, em razão da diferença entre a temperatura da água do sistema em um determinado estado e a temperatura no estado tomado como padrão, é complexo e somente é considerado em situações comparativas de sistemas com temperaturas próximas, de modo que o componente  $\psi_T$  acaba sendo desconsiderado.

O potencial de pressão  $\psi_p$  é definido como a variação do potencial químico da água em virtude da diferença de pressão exercida sobre o sistema em determinado estado e em um determinado estado padrão de pressão, normalmente adotada como a atmosférica local. Se a pressão do sistema estudado estiver acima da pressão atmosférica local, os valores de  $\psi_p$  ocorrem em uma escala positiva. É o caso das células túrgidas, nas quais a parede celular que delimita o protoplasto oferece uma resistência contrária à deformação causada pela variação do volume celular, quando ocorre a difusão da água entre o apoplasto e o simplasto. A pressão de turgescência é necessária à expansão celular e à manutenção da forma de plantas herbáceas. O valor máximo de  $\psi_p$  do simplasto ocorre quando as células estão completamente túrgidas e diminui com a secagem do tecido até atingir um valor zero, quando ocorre a flacidez ou perda total da turgescência. No apoplasto, podem ocorrer situações passageiras de potenciais de pressão positivos, por me-

canismo de pressão radicular, como ocorre, por exemplo, quando há a gutação. Entretanto, a situação comum que ocorre durante o período diurno é a água nos vasos do xilema ficar submetida à tensão originária da transpiração nas interfaces líquido-gás, nos sítios de evaporação da folha, e ser transmitida em toda a coluna de líquido até o solo em razão da coesão das moléculas de água e a alta tensão de cisalhamento dessa substância.

A variação do potencial químico da água em consequência da presença de solutos na seiva é representada pelo potencial osmótico ou de soluto ( $\psi_s$ ). A presença de solutos reduz a energia livre da água no sistema, tornando o potencial cada vez mais negativo com o aumento da concentração. Esse componente é importante no simplasto, enquanto no apoplasto, onde a seiva normalmente é bastante diluída, o seu valor normalmente é menor (menos negativo).

O potencial mátrico ou matricial é um componente de grande importância no sistema solo, como discutido anteriormente. Na planta esse componente representa o efeito da presença de interfaces de adsorção de água, constituídas por coloides, proteínas e macromoléculas na variação do potencial químico da água, e pode estar presente tanto no simplasto como no apoplasto. Neste último, pode ser considerada como um efeito matricial a diminuição da energia livre da água causada pela sua atração por cargas elétricas livres nas paredes dos vasos capilares. No caso das plantas, considera-se haver uma dificuldade em separar o componente matricial do componente osmótico, pois, segundo Jones (1992), a distinção entre  $\psi_m$  e  $\psi_s$  é até certo ponto arbitrária, uma vez que é difícil decidir se as partículas são solutos ou sólidos. Uma aproximação (NOBEL, 1999) é considerar o efeito aditivo dos dois no intuito de reduzir a energia livre de água, denominando-se um potencial "osmótico"  $\psi_p$ , constituído pela soma de um potencial de solutos  $\psi_{s'}$  e o outro potencial mátrico  $\psi_r$ .

O potencial gravitacional é definido como a quantidade de trabalho necessária para transportar, reversível e isotermicamente, uma quantidade unitária de água pura desde um reservatório à pressão atmosférica e em determinada posição de referência no campo gravitacional até um outro ponto de interesse, que pode ficar acima ou abaixo da referência. O potencial gravitacional cresce à razão de  $0,0098 \text{ MPa m}^{-1}$ , ou seja, é desprezível quando o estudo envolve plantas de pequeno porte ou o transporte de água ao nível celular. Esse potencial torna-se relevante em estudos envolvendo plantas de grande porte; nesse caso, o potencial total será equivalente a  $\psi + \psi_g$ .

Em resumo, o potencial de temperatura é complexo e, em se tratando de relações hídricas em vegetais, é desprezado. O potencial gravitacional somente é usado

em estudos envolvendo transporte de água em plantas altas, sendo desprezível em transporte de células ou de órgãos de vegetais de pequeno porte. Os potenciais de soluto e mátrico são convenientemente apresentados como a soma dos dois, representando o potencial osmótico ( $\psi_{\pi}$ ). Dessa forma, o potencial total da água em órgãos vegetais, como a raiz e a folha, acaba sendo considerado como a soma dos componentes de pressão e osmótico ( $\psi = \psi_p + \psi_{\pi}$ ). Nesses órgãos, considerando-se que há uma tendência ao equilíbrio entre a água apoplástica e a simplástica e desconsiderando-se os efeitos térmicos e gravitacionais, pode-se presumir que:

$$\psi_{simplasto} = \psi_{p(simp)} + \psi_{\pi(simp)} \quad (44)$$

e

$$\psi_{apoplasto} = \psi_{p(apo)} + \psi_{\pi(apo)} \quad (45)$$

em que  $\psi_{apoplasto}$  muitas vezes é denominado de tensão da água no xilema.

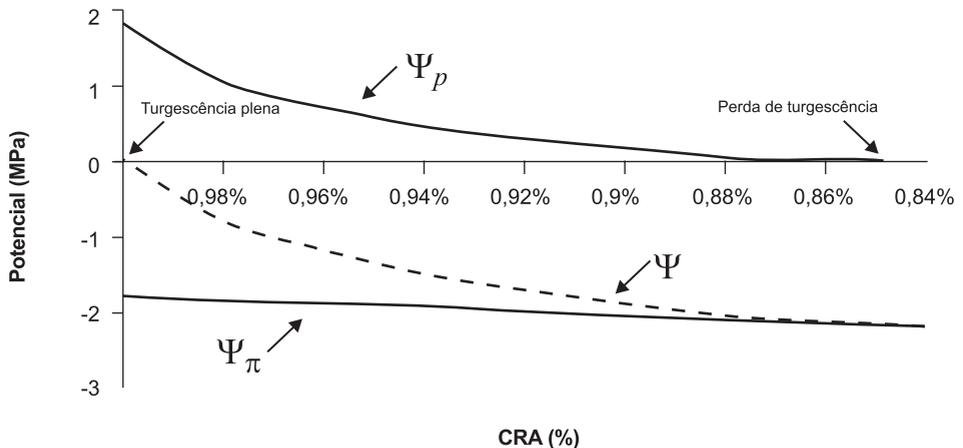
Se considerada a água em equilíbrio em um tecido,  $\psi_{simplasto} = \psi_{apoplasto}$ , todos esses componentes ajustam-se a valores que levam a esse equilíbrio. A Tabela 2 mostra um exemplo de valores dos componentes de pressão e osmótico em razão do grau de turgescência de uma célula.

Essas equações mostram a importância do conhecimento não somente do potencial total de um órgão vegetal, mas também dos seus componentes, pois valores iguais de  $\psi$  podem ser originários de valores de  $\psi_{\pi}$  e  $\psi_p$  diferentes, com significados fisiológicos também diferentes. Uma forma interessante de enxergar as relações entre os componentes do potencial da água e o volume celular, este último variando diretamente com o próprio volume da água celular em curtos intervalos de tempo (portanto, varia com o conteúdo relativo de água de uma folha), é utilizar o dia-

**Tabela 2.** Exemplo ilustrativo de variação dos componentes osmótico e de pressão e do total do potencial da água em razão da turgidez da célula.

Turgidez	$\psi$ (MPa)	=	$\psi_{\pi}$ (MPa)	+	$\psi_p$ (MPa)
Plena	0,0	=	-2,0	+	+2,0
Parcialmente túrgida	-1,1	=	-2,1	+	+1,0
Flácida	-2,2	=	-2,2	+	0,0

grama de Höfler (Figura 2). Quando a célula está completamente túrgida (turgidez máxima ou plena),  $\psi$  pode ser considerado nulo de modo que  $\psi_{\pi} = \psi_p$ . Com a perda de água, a célula diminui o seu volume, reduzindo a sua pressão de turgescência gerada pela extensão elástica da parede celular, que diminui quase que linearmente com o volume da célula até o ponto de turgescência zero (quando  $\psi_p = 0$ ).



**Figura 2.** Relações hídricas em células vegetais pelo diagrama de Höfler.

Considerando-se o simplasto, as variações dos componentes  $\psi_{\pi}$  e  $\psi_p$  são funções da variação da concentração de solutos, com a diminuição do volume de água celular (mas não com a variação do número de moles de solutos, por exemplo), e das propriedades de plasticidade e elasticidade da parede celular que afetam a pressão interna das células, propriedades essas fundamentais para o alongamento celular. A elasticidade da parede celular e, portanto, das células – quantificada pelo módulo de elasticidade  $\epsilon$ , que representa o incremento de pressão interna  $P$  necessário para ocorrer o aumento relativo do volume celular  $V$ , ou seja,

$$\epsilon = \frac{dP}{dV / V} - \text{é importante também pela manutenção da turgescência celular}$$

quando o tecido perde água. Tecidos mais elásticos ( $< \epsilon$ ) possuem a capacidade de reduzir mais lentamente a sua turgescência por unidade de volume de perda de água, de modo que, para um dado valor,  $\epsilon$  de tecidos mais elásticos possui valores de  $\psi_{\pi}$  e  $CRA$  inferiores e de  $\psi_p$  superiores aos apresentados nos tecidos mais rígidos. Por isso, é importante nos estudos de ajustamento osmótico a quantificação de  $\epsilon$ , pois o efeito da maior elasticidade se confunde com o do ajustamento osmótico promovido pelo acúmulo de íons ou solutos orgânicos osmoticamente ativos nas células. O ajustamento osmótico é um mecanismo responsável pelo decréscimo do potencial osmótico por meio do

aumento do número de moles de soluto e é desencadeado pelo mecanismo fisiológico da planta, podendo responder pelo aumento da tolerância do vegetal à seca e salinidade do solo em condições específicas (secagem lenta do solo, por exemplo).

## Transporte de água na fase líquida na planta

Ao se estudar o transporte de água na planta, pode-se estar interessado no fluxo hídrico na escala de tecido ou mesmo celular ou no fluxo a “longa distância”, desde os sítios de absorção nas raízes até os sítios de evaporação nas folhas. No transporte pela planta como um todo, o xilema tem papel fundamental. A capacidade da planta de transportar água verticalmente até distâncias de dezenas de metros, contra a força da gravidade, foi desenvolvida pela evolução de um sistema eficiente de condução de seiva bruta constituído de vasos rígidos e metabolicamente inertes. Ao contrário do xilema, os tecidos vivos têm condutividade hidráulica relativamente baixa e, se as plantas não tivessem evoluído um sistema de baixa resistência hidráulica, teriam dificuldade de se desenvolver verticalmente, pois o transporte seria suficiente para atender somente a uma camada de tecido muito próxima da fonte de água.

O balanço hídrico de uma planta depende dos fatores que afetam a absorção de água pelas raízes e o seu transporte até os sítios de evaporação, bem como dos que afetam a perda de água para a atmosfera a partir das folhas. Para manter um balanço hídrico favorável ao crescimento/desenvolvimento das plantas superiores, elas desenvolveram na evolução filogenética um sistema de controle da perda de água na forma de vapor – que compensa a presença de um eficiente sistema condutor capaz de mover grandes quantidades de água do solo para atmosfera, vencendo as resistências hidráulicas impostas no sistema radicular, caules e folhas –, além da elevada área foliar, para manter uma assimilação adequada de dióxido de carbono. O controle do balanço de água é possível pela presença de uma epiderme relativamente impermeável às trocas gasosas e de um sistema controlador dos fluxos de vapor e dióxido de carbono, sistema esse representado pelos estômatos.

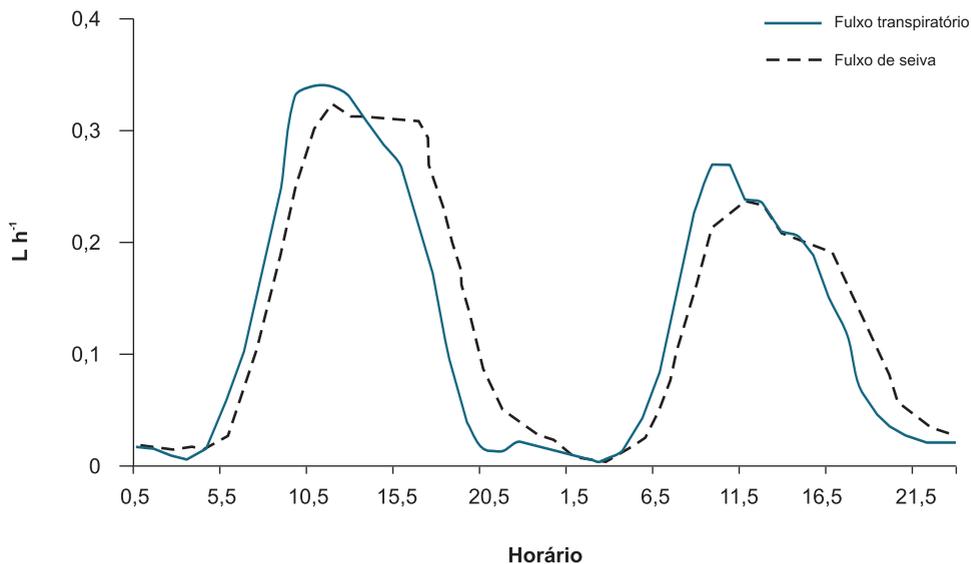
Nos vegetais superiores, uma ligeira falta de água que ocorre em torno do meio-dia, até mesmo em plantas irrigadas, pode causar distúrbios ao metabolismo da planta. Uma ligeira diminuição de turgescência celular, suficiente para causar o fechamento temporário dos estômatos nos horários de elevada disponibilidade de energia e deficit de saturação de vapor do ar, torna a absorção de di-

óxido de carbono difícil, diminuindo sensivelmente a atividade de assimilação de carbono. Por isso, os vegetais vivem o eterno “dilema das prioridades opostas”, ou seja, abrir os estômatos para a entrada de  $\text{CO}_2$ , mas fechá-los, quando necessário, para evitar a perda excessiva de água, com tendência de favorecer a assimilação fotossintética (BOYER, 1976).

Salvo em condições de elevada umidade do solo e de períodos de baixa irradiância solar e elevada umidade atmosférica, quando a planta pode realizar a absorção de água ativamente, mediante a pressão radicular (KRAMER, 1983), a maior parte da água absorvida pelo vegetal movimenta-se das raízes até os sítios de evaporação por fluxo de massa, constituindo a corrente transpiratória, que representa o transporte de longa distância na planta. O eficiente sistema condutor das plantas permite o transporte de água do solo até a parte aérea, vencendo grandes distâncias no caso de árvores de grande porte, passando somente por algumas camadas de células vivas. O fluxo de água nos diferentes órgãos da planta transpõe resistências cujas magnitudes variam conforme o órgão, gerando uma queda do potencial da água ao longo do caminho.

Um exemplo ilustrativo do que ocorre em plantas que possuem elevada capacidade no tronco e nos ramos pode ser observado na Figura 3. Ao longo de um dia, comumente é verificada a defasagem entre a absorção de água pelas raízes e a transpiração das folhas, explicada pelo fato de que na parte da manhã há uma tendência de o fluxo de seiva não acompanhar a variação da transpiração. Nessa parte do dia, a transpiração tende a acompanhar mais a variação das condições atmosféricas, cujo processo transpiratório ocorre nesse período parcialmente a expensas da água armazenada em tecidos. Já no final do dia, quando a transpiração tende a cessar, o fluxo de seiva continua a ocorrer em taxa que tende a repor a água presente nos tecidos e perdida ao longo do curso de um dia. Esse rearmazenamento hídrico pode continuar a ocorrer em grande parte do período noturno. Quando há deficiência de água no solo, a planta tende a prolongar ainda mais o período de absorção de água no período noturno, na tentativa de reduzir o déficit hídrico interno.

O modelo integrado do transporte de água no SSPA descrito pela equação 1, apesar de ter influenciado os grandes avanços nos estudos de relações hídricas e transporte de água através de vegetais, possui uma série de simplificações que podem causar problemas. Apesar das simplificações impostas pela equação de fluxo de água e fluxo de vapor no SSPA, segundo Jones e Tardieu (1998), ela se aplica com pequenos erros em plantas herbáceas e anuais de pequeno porte.

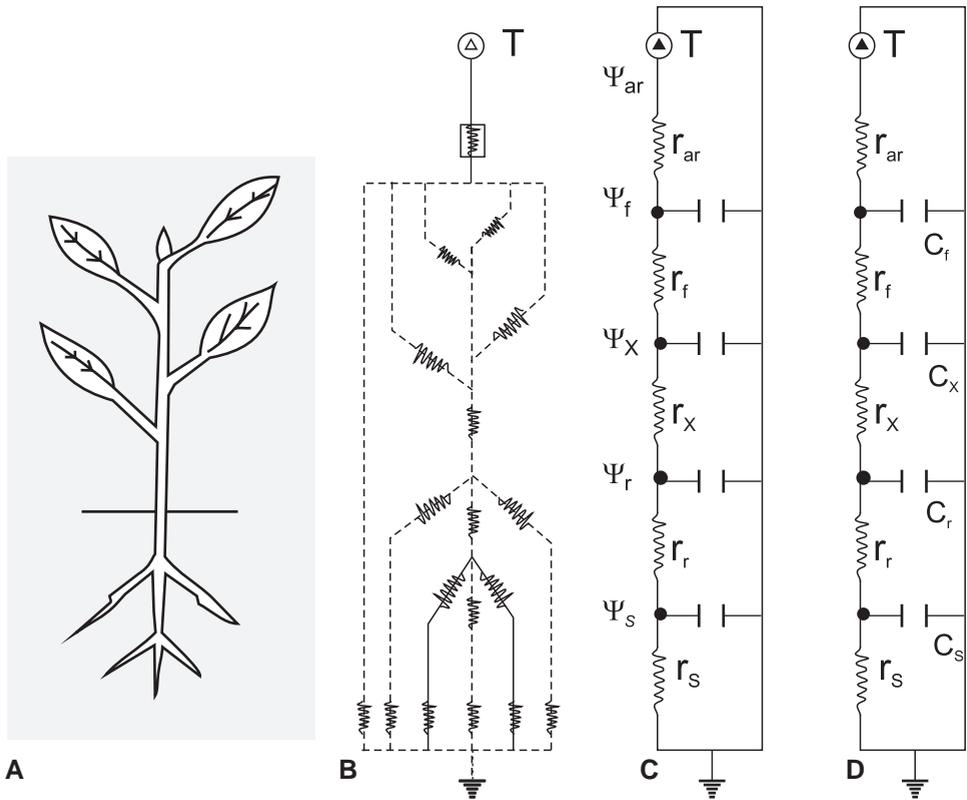


**Figura 3.** Variação diária do fluxo de seiva e do fluxo transpiratório de macieira ao longo de um dia.

Fonte: Angelocci (2002) e Valancogne e Nasr (1989).

Quando se trata de espécies arbóreas, as relações entre os processos de transpiração e de absorção de água pela planta geralmente não ocorrem em equilíbrio dinâmico, em razão da grande quantidade de água armazenada nos tecidos (capacitância hídrica) desses vegetais. Nesse caso, a modelagem pode ser realizada com sucesso, considerando-se modelos que incluem elementos capacitivos para simular o fluxo dinâmico (Figura 4d).

Deve-se considerar que, em um modelo de resistências hidráulicas, uma simplificação é assumir, em analogia com a Lei de Ohm, que elas são constantes com a variação do fluxo em cada parte do caminho no qual ocorre o transporte da fase líquida. Entretanto, existem evidências de serem as resistências hidráulicas variáveis em razão do fluxo de água, principalmente em raízes, dificultando a aplicação do modelo. Deve-se lembrar também de que, do solo até os sítios de evaporação nas folhas, o transporte ocorre na fase líquida e, dos sítios até a atmosfera, na fase de vapor. Embora a força motriz para o fluxo seja a diferença do potencial químico da água, na fase de vapor o fluxo é proporcional à diferença de pressão de vapor entre folha e ar (diferença de temperatura folha-ar). Como a diferença de potencial da água na folha e da atmosfera é extremamente grande, por exemplo, -1,0 MPa na folha e -100 MPa na atmosfera, a resistência na fase de vapor aumenta desproporcionalmente se calculada somente a partir das diferenças de potencial



**Figura 4.** Representação simplificada de uma planta (A); rede de resistências correspondentes aos vários segmentos do SSPA, sendo a transpiração a força motriz para o fluxo (B); modelo simplificado envolvendo as resistências do solo ( $r_s$ ), raiz ( $r_r$ ), xilema ( $r_x$ ), folha ( $r_f$ ) e ar ( $r_{ar}$ ) e os potenciais da água do solo ( $\psi_s$ ), raiz ( $\psi_r$ ), xilema ( $\psi_x$ ), folha ( $\psi_f$ ) e ar ( $\psi_{ar}$ ) (C); esquema que inclui a capacitância em cada parte do sistema (D). T representa a transpiração e sua direção.

Fonte: adaptado de Jones e Tardieu (1998).

da água, levando à interpretação equivocada de existir uma relação extremamente grande entre as resistências da fase de vapor e da fase líquida (LEVITT, 1966).

Deve-se considerar, adicionalmente, que o fluxo de água no SSPA é regulado pela abertura estomática e que os gradientes de concentração de vapor folha-ar representam a força motriz para o fluxo entre as folhas e a atmosfera, representado pela transpiração das plantas ( $T$ ). Entretanto, fatores internos das plantas e os que regulam o transporte de água no solo também afetam o balanço de água na planta, demonstrando a importância de se tratar o SSPA de maneira integrada, considerando-se as particularidades existentes em cada parte do sistema. Segundo Kramer (1983), o fluxo de água no SSPA é controlado em primeira instância pela resistência dos estômatos, da cutícula e da interface folha-ar. Contudo, pela interdependência

das partes constituintes do SSPA, qualquer alteração em uma parte desse sistema pode afetar as outras. Por exemplo, com a diminuição da taxa de absorção radicular, ocorre o deficit hídrico nas folhas e, por consequência, a redução da turgescência e abertura estomática, o que implica uma maior resistência ao transporte de vapor para atmosfera como mecanismo da planta para recuperar a turgescência.

Essas relações podem ser ainda mais complexas do que as apresentadas anteriormente e envolver o transporte hidráulico de substâncias (ácido abscísico – ABA, por exemplo) produzidas nos ramos e raízes como estímulo ao fechamento estomático. Nesse caso não existiria uma resposta direta dos estômatos ao deficit interno da planta, mas sim à diminuição do teor de água do solo, mesmo que o estado hídrico da planta não tenha mudado. Tem-se sugerido que o mecanismo envolve o transporte de um sinal (provavelmente químico) das raízes para as folhas, de modo que estas reduzam a perda de água da planta quando as raízes ficam submetidas à secagem acentuada do solo.

## Fluxo de vapor d'água entre as folhas e a atmosfera (transpiração)

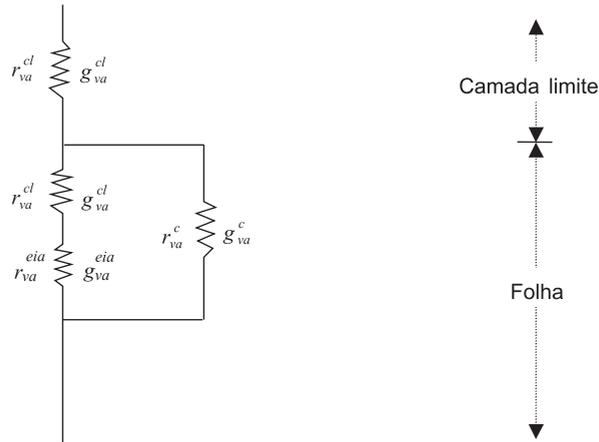
O transporte de água na fase de vapor ocorre basicamente entre as folhas e a atmosfera, reconhecendo-se duas vias de ocorrência: a transpiração cuticular e a transpiração estomática. A segunda via predomina largamente nas espécies de interesse econômico em condições cujos estômatos não estão fechados. A transpiração estomática ocorre a partir dos sítios de evaporação nas paredes celulares, passando pelos espaços intercelulares de ar, estômatos, camada-limite de ar da folha e entrando na camada turbulenta, a partir da qual o vapor é transportado predominantemente para cima na atmosfera. Até a camada-limite, assume-se que o transporte ocorre por difusão gasosa molecular, que pode ser representado por um circuito de resistências (ou do seu inverso, condutâncias) difusivas (Figura 5).

A densidade de fluxo de vapor d'água (por unidade de área foliar) pode, então, ser calculada a partir do uso da Lei de Fick adaptada, considerando-se fluxo em equilíbrio dinâmico:

$$F_{va} = f g_{va} \times \Delta C_{va} = \Delta C_{va} / f r_{va} = c l g_{va} \times \Delta C_{va} = \Delta C_{va} / c l r_{va} \quad (46)$$

em que  $F_{va}$  é a densidade de fluxo de massa de vapor (taxa de transpiração) foliar (em  $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ou, mais comumente,  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $f g_{va}$  e  $c l g_{va}$  são as condutâncias foliar e da camada-limite respectivamente (em  $\text{m s}^{-1}$ , sendo comumente

### Camada turbulenta de ar



**Figura 5.** Circuito representativo do caminho de vapor e das condutâncias ( $g_{va}$ ) e resistências ( $r_{va}$ ) ao fluxo entre uma folha e a camada turbulenta da atmosfera, em que *eia* = espaços intercelulares de ar; *est* = estômatos; *c* = cutícula; *cl* = camada-limite de ar.

usado  $\text{mm s}^{-1}$ ),  $f r_{va}$  e  $cl r_{va}$  as respectivas resistências à difusão de vapor ( $\text{s m}^{-1}$ ) e  $\Delta C_{va}$  é a diferença de concentração de vapor entre os sítios de evaporação e o ar turbulento (em  $\text{kg m}^{-3}$ ).

Conforme mostra a Figura 5, a resistência foliar é composta de duas resistências em série (estômatos e espaços intercelulares de ar) e uma em paralelo (cuticular). Quando são utilizados porômetros de fluxos difusivos nas medidas, a resistência (ou a condutância) foliar é determinada, embora muitas vezes se fale em medidas da resistência ou da condutância estomática, as quais, em condições normais, determinam a magnitude de  $f r_{va}$  ou  $f g_{va}$ . Em vez de se trabalhar com a diferença de concentração de vapor ar-folha, prefere-se atualmente utilizar a diferença da fração molar de vapor d'água entre a folha e o ar ( $N_{va}$  expressa em mol de vapor/mol de ar, podendo ser considerado adimensional), associada à densidade de fluxo em base molar:

$$F_{va} = f g'_{va} \times \Delta N_{va} = \Delta N_{va} / f r'_{va} = cl g'_{va} \times \Delta N_{va} = \Delta N_{va} / cl r'_{va} \quad (47)$$

sendo  $F_{va}$ ,  $g'_{va}$  e  $r'_{va}$  expressos em moles por unidades de área foliar e de tempo ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

O uso de  $g'_{va}$  e  $r'_{va}$  é preferido atualmente, pois os seus valores são independentes da pressão atmosférica e menos dependentes da temperatura em relação a  $g_{va}$  e  $r_{va}$  (ANGELOCCI, 2002).

O uso do conceito de resistências/condutâncias difusivas e da analogia a um circuito elétrico facilita bastante o estudo das trocas gasosas planta-atmosfera, não somente porque representam variáveis de comparação em estudos diferentes, mas também porque permite entender com maior facilidade os fatores do ambiente que afetam a transpiração. Os valores de condutâncias foliares máximas (ou de resistências mínimas) são variáveis em razão das espécies, pois dependem da densidade de estômatos e das suas dimensões (abertura e profundidade), sendo afetados também pela presença de estômatos em um ou em ambas as faces da folha (folhas hipoestomáticas e anfistomáticas respectivamente). Valores máximos de  $f_{g_{va}}$  encontrados estão em torno de  $20 \text{ mm s}^{-1}$  ( $f_{r_{va}}$  equivalente de  $50 \text{ s m}^{-1}$ ), correspondentes a  $f_{g'_{va}}$  de  $0,83 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $f_{r'_{va}} = 1,2 \text{ s m}^2 \text{ mol}^{-1}$ ). Em razão dos fatores do ambiente, como irradiância solar, temperatura e concentração de vapor do ar, velocidade do vento e disponibilidade hídrica, essas condutâncias/resistências são extremamente variáveis, podendo  $f_{g_{va}}$  atingir valores nulos (resistência infinita). O mesmo acontece com a condutância da camada-limite, que é diretamente proporcional à velocidade do vento e inversamente proporcional à dimensão da folha, podendo assumir valores até da mesma magnitude dos encontrados em folhas, mas variando muito com essas duas variáveis.

## Fatores que afetam a absorção de água e a transpiração pelas plantas

A transpiração, assim como a evaporação da água do solo, ou seja, a evapotranspiração de uma cobertura vegetal, é dependente do suprimento energético (radiação líquida –  $R_n$ ), do gradiente de pressão de vapor entre a superfície e a atmosfera e da velocidade do vento. A evaporação do solo é dependente da umidade de sua superfície. O conteúdo de água no solo, bem como sua capacidade de conduzir água até as raízes, e sua salinidade também devem ser considerados (ALLEN et al., 1998). Além disso, a transpiração é influenciada por fatores ligados à própria planta e ao sistema de plantio. Os fatores das plantas referem-se às características da parte aérea e do sistema radicular. O sistema de plantio (espaçamento e orientação do plantio) afeta a interceptação da radiação solar e a resistência aerodinâmica ao fluxo de vapor.

Neste item, os fatores que afetam a absorção da água e a transpiração das plantas serão examinados com maior detalhamento, como subsídio para o estudo da evapotranspiração. Para isso, eles serão classificados em dois grandes grupos, o dos fatores do ambiente (ligados ao solo e à atmosfera) e o dos fatores da planta.

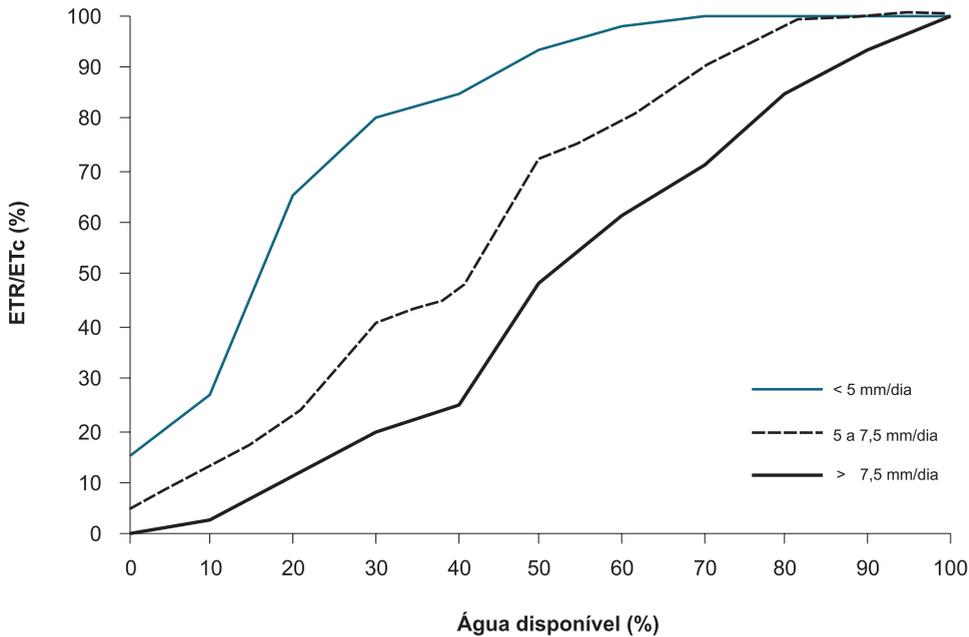
## Fatores ambientais

### Disponibilidade de água no solo

As características físicas do solo, como a textura e a estrutura, afetam diretamente a capacidade de absorção de água pela planta, pois estão ligadas à capacidade do solo de armazenar água e transportá-la para a superfície das raízes. O conhecimento do armazenamento de água disponível é uma informação básica para projetos de irrigação, considerando-se o limite superior (capacidade de campo) e o inferior (ponto de murcha permanente), que definem a capacidade de água disponível (*CAD*). Porém, quando há esgotamento da água do solo, antes de a umidade atingir o ponto de murcha permanente, as atividades fisiológicas são afetadas, ocorrendo a redução do crescimento da cultura, como consequência da diminuição da assimilação de  $\text{CO}_2$  pelo aumento da resistência estomática e da redução da transpiração.

Como a dinâmica da água na planta envolve interação de fatores do solo, da planta (sistema radicular e área foliar) e da atmosfera (demanda atmosférica), é mais apropriada a utilização do conceito de “água facilmente disponível no solo”, representando uma fração da *CAD* passível de ser esgotada sem que a planta sofra deficiência hídrica, situação na qual a planta transpira potencialmente.

A lâmina de água facilmente disponível depende do tipo de solo, da profundidade do sistema radicular inerente à espécie de interesse e da demanda atmosférica. Solos arenosos, por exemplo, tendem a ter menor capacidade de água disponível por unidade de profundidade, com um limite mínimo de cerca de 0,5 mm de água/cm de profundidade, enquanto solos argilosos podem chegar num limite extremo e apresentarem 2,0 mm de água/cm de profundidade. Verifica-se assim que, quanto maior o volume de solo explorado pelo sistema radicular, maior a disponibilidade de água para a planta. Quanto maior a demanda atmosférica por água, maior a exigência hídrica da planta e maior deve ser a disponibilidade de água para ela não sofrer deficit, ou seja, a fração da água facilmente disponível deve ser crescente com o aumento da demanda. Esse fato pode ser observado na Figura 6. Se a demanda atmosférica for baixa (evaporação do tanque Classe A –  $ECA < 5 \text{ mm dia}^{-1}$ ), a planta consegue extrair água do solo até uma certa porcentagem da *CAD*; se a demanda for muito alta ( $ECA > 7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ), mesmo com bastante umidade no solo, a planta não consegue extraí-la numa taxa compatível com suas necessidades, resultando em fechamento temporário dos estômatos para evitar o secamento da folha (PEREIRA et al., 1997).



**Figura 6.** Inter-relação da evapotranspiração relativa de plantas (evapotranspiração real =  $ETR$  e evapotranspiração máxima da cobertura =  $ET_c$ ) com a porcentagem de água disponível no solo.

Fonte: adaptado de Denmead e Shaw (1962).

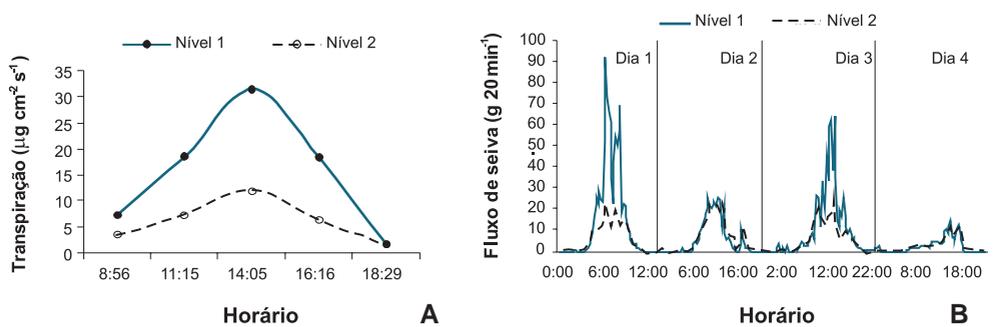
## Salinidade do solo

O efeito da concentração salina na atividade fisiológica das plantas, como a redução do crescimento, da absorção radicular e da transpiração, está ligado à redução da energia livre (potencial) da água no solo, pela concentração de sais osmoticamente ativos na solução do solo e pela toxicidade causada por elementos acumulados nos tecidos vegetais, como sódio, boro e cloro. O efeito da salinidade no rendimento das culturas é dependente da tolerância, da espécie e dos mecanismos que ela possui para a manutenção da turgescência quando submetida ao estresse salino.

O reduzido crescimento da planta em estresse salino é atribuído, principalmente, à redução da absorção de água em razão do efeito osmótico no solo. Kramer e Boyer (1995) consideram simplista essa visão, por observarem que, mesmo com baixo fluxo hídrico, as plantas conseguem absorver sal e recuperam o seu estado hídrico por reduzir o potencial osmótico da raiz, a exemplo de plantas transferidas de soluções de baixa para alta salinidade. Acrescentam que plantas submetidas ao aumento gradual da salinidade do solo mantêm a sua turgescência em razão dos mecanismos de ajustamento osmótico, ou seja, a tolerância à salinidade estaria ligada à quantidade de sal acumulado no protoplasma da planta sem ha-

ver injúria. O efeito da concentração salina nos processos metabólicos ainda não são bem explicados, mas, segundo Kramer (1983), a elevada concentração de sal mantém o potencial da água da célula baixo e provavelmente reduz a hidratação proteica e a atividade enzimática.

De maneira geral, a planta sofre com a permanência da elevada salinidade no solo, seja pelo aumento do potencial osmótico do solo, seja pela toxidez, o que se traduz na diminuição da absorção de água e da transpiração, observada na Figura 7. Nesta, a transpiração por unidade de área foliar do tomateiro é menor para uma planta submetida a um nível superior de salinidade do solo (nível 2). Esse comportamento pode ser observado analisando-se o fluxo de seiva das duas plantas ao longo de 4 dias, sendo praticamente iguais em dias nublados e diferentes quando a demanda atmosférica é elevada. Nessa condição, o fluxo de água verificado na planta mais estressada (nível 1) não acompanha o ritmo da menos estressada (nível 2).



**Figura 7.** Transpiração de plantas de tomate submetidas a dois níveis de salinidade, determinada com porômetro de equilíbrio dinâmico (A); e fluxo de seiva das plantas ao longo de 4 dias, determinado a partir do método de balanço de calor no caule (B). Nível 1:  $CE$  da solução do solo de  $7 \text{ dS m}^{-1}$ ; Nível 2:  $CE$  da solução do solo de  $11 \text{ dS m}^{-1}$ .

Fonte: Coelho Filho e Blanco (2004).

## Aeração do solo

Quando o solo está encharcado ou inundado, há preenchimento dos espaços porosos pela água. As trocas gasosas nessa situação são limitadas em decorrência da baixa difusão do oxigênio na água comparada à difusão no ar (10.000:1), limitando rapidamente o fornecimento desse elemento para a raiz.

A aeração adequada do solo é fundamental para a manutenção da atividade metabólica do sistema radicular da planta, o que permite a absorção adequada de água e nutrientes. A baixa aeração do solo aumenta a resistência ao fluxo de água

na raiz, provocando a redução da absorção pelo sistema radicular, da assimilação de  $\text{CO}_2$  e da transpiração da planta. Em plantas submetidas a estresse prolongado, ocorre a redução do crescimento radicular, da parte aérea da planta e do transporte de nutrientes, a secagem da planta e a morte (SCHAFFER et al., 1998).

O tempo que a planta pode suportar níveis críticos de oxigenação depende da tolerância da espécie vegetal, ligada aos mecanismos que a planta possui, como o aparecimento de raízes adventícias, facilitando o transporte de  $\text{O}_2$  para as raízes em baixa aeração, e a hipertrofia do caule acima da linha de água, resultando no aparecimento de lenticelas, a exemplo do que ocorre em mangueiras (SCHAFFER, 1998). A tolerância pode ser baixa como observado em plantas de abacate (WHILEY; SCHAFFER, 1994) e de mamão, estas últimas podendo morrer após 2 a 4 dias em solo inundado e, caso não morram, não adquirem um desenvolvimento normal (MARLER et al., 1994) ou elevado, como observado em mangueiras, que suportam meses em inundação, sem haver morte da planta, ocorrendo a redução da taxa de crescimento da planta (SCHAFFER, 1998).

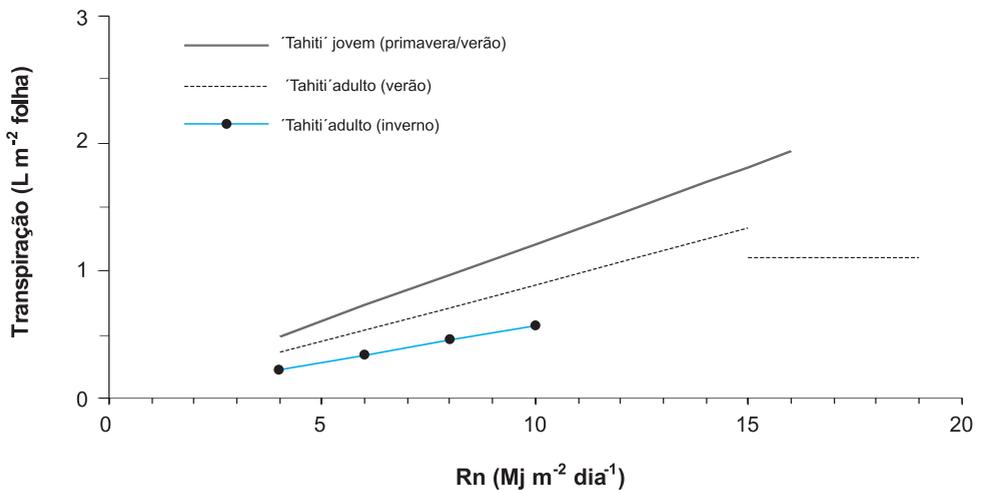
### **Temperatura ambiente**

A temperatura ou calor disponível para a planta é fundamental para o adequado crescimento e desenvolvimento do vegetal, devendo ficar entre os limites críticos superior e inferior (de maneira genérica entre as espécies de interesse econômico, aproximadamente a  $10\text{ }^\circ\text{C}$  e  $40\text{ }^\circ\text{C}$  para não haver paralisação das atividades fisiológicas do vegetal). É importante também a duração do período de exposição vegetal ao estresse por temperatura. Geralmente a paralisação do crescimento/desenvolvimento do vegetal é reversível quando ele fica exposto a pequeno período abaixo do limite crítico inferior. Entre esses dois limites, existem as faixas ótimas para as plantas, as quais irão variar de acordo com a espécie vegetal e a fase fenológica da planta.

As injúrias causadas pelas elevadas temperaturas estão relacionadas à síntese proteica. A temperatura basal superior depende do tipo de metabolismo de carbono da planta ( $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  ou CAM). As plantas  $\text{C}_4$  e CAM desenvolvem-se melhor em ambientes mais quentes e apresentam a máxima atividade fotossintética quando as temperaturas encontram-se entre  $30\text{ }^\circ\text{C}$  e  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto as plantas com metabolismo  $\text{C}_3$  possuem as maiores taxas fotossintéticas e máximos crescimentos entre  $25\text{ }^\circ\text{C}$  e  $30\text{ }^\circ\text{C}$  (PIMENTEL, 1998), porque nas  $\text{C}_3$  a fotorrespiração, que também cresce com a temperatura, é superior à observada nas  $\text{C}_4$ , afetando a fotossíntese líquida, representada pelo balanço entre os ganhos e perdas de carbono da planta.

As baixas temperaturas do solo reduzem a absorção de água pela planta tanto pela redução da permeabilidade das raízes, como pelo aumento da viscosidade da água, resultantes do aumento da resistência ao transporte de água no solo. Esse efeito combinado duplica, aproximadamente, a resistência ao fluxo de água do solo para a raiz quando há um decréscimo da temperatura de 25 °C para 5 °C (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979). A redução da absorção radicular também pode ser explicada pela baixa atividade da planta, o que diminui a capacidade de desenvolvimento radicular e exploração do solo (LARCHER, 1977). A atividade metabólica pode ser responsável pelo acúmulo de solutos na raiz, afetando também a absorção osmótica (ANGELOCCI, 2002).

O efeito de baixas temperaturas na redução da condutividade do sistema radicular é bem documentado em citros (KRIEDMANN; BARRS, 1981; SYVERTSEN; LLOYD, 1994) e pode ser observado ao comparar a taxa de transpiração de árvores de lima ácida em mesma disponibilidade energética, em períodos frios e quentes do ano (Figura 8).



**Figura 8.** Relação entre a transpiração de lima-ácida 'Tahiti' por unidade de área foliar e a radiação líquida determinada sobre gramado em Piracicaba, SP. As limeiras jovens possuíam área foliar de até 1,1 m<sup>2</sup> e as adultas, 48 m<sup>2</sup> e 99 m<sup>2</sup>.

Fonte: adaptado de Coelho Filho (2002) e Marin et al. (2001).

## Balço de energia radiante

A energia radiante é primordial para a ocorrência dos processos fisiológicos das plantas e físicos do ambiente. O saldo de radiação ou radiação líquida ( $R_n$ ) representa o total de energia radiante disponível no sistema após o balanço entre seus fluxos de entrada e de saída, compondo o balanço de ondas curtas ( $BOC$ ) e o de

ondas longas (*BOL*), de modo que  $R_n = BOC + BOL$ . Os valores instantâneos e periódicos do *BOC* dependem da irradiância solar global e esta é dependente da hora do dia, época do ano e condições atmosféricas e das características radiométricas da superfície vegetada ligada à reflexão de ondas curtas (espécie, porcentagem de cobertura do solo e estágio fenológico); enquanto os do *BOL* dependem também de características atmosféricas (principalmente teor de vapor d'água e nebulosidade) e da própria temperatura da superfície. No sistema vegetado, basicamente o saldo de radiação pode ser repartido no aquecimento do ar e da planta (calor sensível), no aquecimento do solo, nos processos de sínteses biológicas, na evaporação da água do solo e na transpiração das plantas. Sem limitação hídrica no solo, a maior fração da energia disponível, representada pelo saldo de radiação descontado do fluxo de calor no solo ( $R_n - G$ ), é usada na forma de calor latente de vaporização. Quando há limitação de água, a partição de  $R_n$  começa a favorecer o calor sensível, ou seja, o aquecimento do ar e da cobertura vegetal, além de aumentar o poder evaporante do ar.

Portanto, em cultivos irrigados, o processo que predomina na partição da energia radiante disponível é a evapotranspiração. Quando a cultura apresenta baixo índice de área foliar (*IAF*), cobrindo pequena parcela do solo, o processo dominante é a evaporação da água no solo, principalmente quando se está irrigando por aspersão. As perdas por evaporação são minimizadas, diminuindo-se a superfície molhada do solo, por exemplo, para irrigação localizada. Com o aumento do *IAF*, a energia é utilizada basicamente para a transpiração, principalmente em se tratando de árvores (como em pomares), que possuem elevada superfície foliar, e em sistemas localizados de irrigação.

### **Umidade e temperatura do ar – velocidade do vento**

A transpiração depende diretamente da diferença de concentração de vapor entre a folha (próxima à saturação) e a atmosfera. Desse modo, o aumento da umidade relativa do ar diminui as diferenças de concentração de vapor e tende a fazer que a transpiração diminua. Por sua vez, um aumento da temperatura faz que o deficit de saturação de vapor do ar aumente e também as diferenças entre concentração de vapor folha-ar, de modo que, mantidas as outras variáveis constantes, a transpiração se eleva até o momento em que há regulação estomática para evitar a perda excessiva de água.

O vento atua amplificando a ação dos outros elementos meteorológicos, aumentando a energia disponível para a planta transpirar, mediante o transporte

energético por advecção de uma área mais seca para outra mais úmida. Mediante o movimento do ar na superfície foliar, remove o vapor d'água, aumentando as diferenças de concentração de vapor folha-ar e contribuindo para o aumento da perda de vapor d'água da folha. A velocidade do vento afeta também a condutância difusiva da camada-limite da folha, aumentando-a com o aumento da velocidade e, conseqüentemente, aumentando a taxa transpiratória.

O efeito combinado (velocidade do vento, temperatura e umidade do ar) define a demanda atmosférica por vapor d'água (PEREIRA et al., 2002).

## **Fatores relacionados à planta**

### **Características das folhas**

As características das folhas são muito importantes nas trocas de vapor entre planta e atmosfera e estão relacionadas ao tamanho, à forma, à orientação, à exposição à radiação solar, à anatomia, às características da superfície e às dimensões dos estômatos.

O tamanho e a forma das folhas afetam o transporte de vapor folha-ar, atuando no aumento da resistência da camada-limite da superfície foliar. Há um aumento da resistência ao transporte de vapor de uma superfície com o acréscimo das dimensões foliares. Assim, mantendo constantes todos os fatores que afetam a perda de água pela folha, com o aumento das dimensões foliares, a transpiração por unidade de área foliar diminui. Exemplificando, o aumento de 1 cm para 5 cm das dimensões foliares na direção que sopra o vento faz a espessura da camada-limite quase dobrar, aumentando proporcionalmente a resistência difusiva dessa camada (ANGELOCCI, 2002).

A posição da folha e a maneira como ela se distribui na copa afetam a transpiração por unidade de área foliar. Plantas que possuem folhas que se posicionam paralelamente à incidência dos raios solares, reduzem o autossombreamento, aumentam a eficiência de absorção energética e geralmente transpiram mais por unidade de área foliar. O posicionamento das folhas também afeta o movimento de ar, o transporte de vapor folha-ar e, conseqüentemente, a transpiração.

A estrutura das folhas afeta a transpiração e está relacionada à composição da cutícula, ao número, à distribuição, ao tamanho e à distribuição dos estômatos. A presença de uma camada maior de células na folha e de uma cutícula espessa depende da adaptação evolutiva da espécie, relacionada aos fatores ambientais

predominantes e aos fatores ligados ao estágio de desenvolvimento da folha. Como exemplo, a transpiração cuticular de folhas jovens pode apresentar-se mais alta que em folhas velhas em razão de a cutícula ser mais fina e menos cerosa, porém, em folhas senescentes, a transpiração muitas vezes aumenta porque a cutícula sofre rachaduras e se torna mais porosa (SUTCLIFFE, 1980).

Plantas de sombra apresentam cutícula fina, e a transpiração cuticular pode representar até 30% do total no período diurno, enquanto nas suculentas de deserto é desprezível (SUTCLIFFE, 1980). Folhas de sol contêm mais camadas de células que as de sombra. As células paliçádicas estão mais juntas entre si e são alongadas em direção perpendicular à superfície foliar, funcionando como um mecanismo de proteção contra o excesso de luz (BERNARDES; LIMA, 2000). Apresentam também um sistema vascular mais desenvolvido e cutícula mais espessa (ANGELOCCI, 2002), evitando a perda excessiva de água. Folhas de sombra apresentam modificações anatômicas que favorecem a sua maior eficiência fotossintética, com a tendência de serem maiores e terem elevados teores de clorofila, favorecendo a coloração verde-escura. As folhas também são capazes de apresentar modificações anatômicas dependentes da quantidade de luz disponível no ambiente, a exemplo de sistemas agroflorestais (BERNARDES et al., 1997).

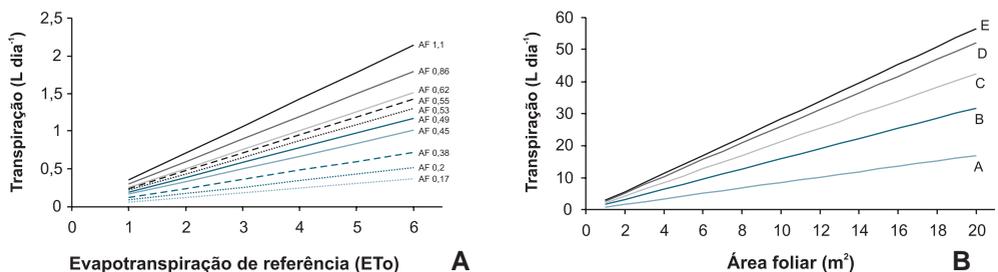
As plantas de ambiente seco possuem características xeromórficas, enquanto as mesomórficas são adaptadas a locais sem deficiência hídrica. As xeromórficas apresentam características que se aproximam mais daquelas das folhas de sol e as mesomórficas, das de sombra. Embora se assuma que as folhas mesomórficas devam perder mais água que as xeromórficas em determinada condição ambiental, por terem maior volume de espaços internos de ar e cutícula menos espessa, verifica-se que, em condições hídricas satisfatórias, a densidade de fluxo de vapor d'água de certas espécies com folhas de caráter xeromórfico é da mesma magnitude e até maior do que as espécies com folhas tipo mesomórficas (ANGELOCCI, 2002). Um exemplo ocorre com a cultura do abacaxi, que possui características típicas das plantas xerófilas e o metabolismo ácido das crassuláceas (*CAM*), que favorecem a eficiência do uso de água em condições hídricas não favoráveis comparativamente a plantas C3 e C4. Mas, em condições de água facilmente disponível, elas passam a usar o metabolismo de plantas C3, transpirando mais por unidade de área foliar, como pode ser verificado no capítulo de irrigação e fertirrigação do abacaxi.

A presença de pilosidades diminui a transpiração por unidade de área foliar, apesar de sugerir o aumento em virtude da elevação da superfície evaporante. A existência de pelos favorece a reflexão de radiação solar e, conseqüentemente,

a absorção solar, aumenta a resistência da camada-limite da folha e reduz a temperatura da folha, diminuindo as necessidades de dissipação de calor. Por isso, segundo Sutcliffe (1980), não é surpresa que muitas plantas do deserto sejam densamente pilosas.

A transpiração é dependente da superfície foliar total de uma planta. Quanto maior a superfície foliar, para um mesmo nível energético, maior será a transpiração (Figura 9). Porém, nem sempre o aumento da transpiração é proporcional ao da área foliar, pois o aumento da área acarreta maior densidade de folhagem e maior autossombreamento das folhas das plantas, responsável pela redução da condutância estomática (COELHO FILHO, 2002; JONES et al., 1985). A transpiração de plantas adultas de lima ácida 'Tahiti', com área foliar variando entre 48 m<sup>2</sup> e 64 m<sup>2</sup>, foi sempre inferior à observada em plantas jovens para uma mesma demanda atmosférica, como discutido por Coelho Filho (2002). Por sua vez, há estudos demonstrando que a remoção de parte da área foliar não se traduz em redução proporcional da densidade de fluxo de transpiração, mas no seu aumento, sugerindo que isso ocorra em decorrência da maior exposição das folhas à radiação (menor densidade foliar) e da variação na interação do vento com a vegetação, quando ocorre o raleamento das folhas, bem como provavelmente da modificação na relação área foliar-área de raízes (ANGELOCCI, 2002).

O índice de área foliar (*IAF*) é uma variável muito utilizada para expressar o crescimento da planta e afeta a evapotranspiração das culturas anuais. Em culturas perenes, as relações existentes são mais complexas e o *IAF* não é a variável mais indicada. Nesse caso, a área foliar total é a base para a modelagem da transpiração (BRAUN et al., 2000; COELHO FILHO, 2002), por ser a informação que melhor padroniza as diferentes características dos pomares, as quais afetam a transpira-



**Figura 9.** Transpiração de plantas de lima ácida 'Tahiti' com área foliar (*AF*) entre 0,17 m<sup>2</sup> a 1,1 m<sup>2</sup>, em dias com evapotranspiração de referência (*ETo*) variando entre 1 mm dia<sup>-1</sup> a 6 mm dia<sup>-1</sup> (A); transpiração (fluxo de seiva) de maçã com área foliar variando de 1 m<sup>2</sup> a 20 m<sup>2</sup>, e dias com valores distintos de *ETo* – A, B, C, D e E – (B).

Fonte: adaptado de Angelocci e Valancogne (1993) e Coelho Filho (2002).

ção das plantas, como o espaçamento de plantio, a idade do pomar, a área foliar total, a resistência aerodinâmica da planta (plantas isoladas são mais expostas ao vento que coberturas contínuas), a densidade de folhas e a exposição da planta à radiação solar.

### **Sistema radicular e relação raiz-copa**

A informação da profundidade e extensão do sistema radicular da cultura é fundamental para a escolha, o dimensionamento e o manejo de sistemas de irrigação. É importante salientar que, em plantios situados no Semiárido, o fornecimento de água pelo sistema de irrigação é que irá limitar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, sendo maior ou menor em razão das características de distribuição de água pelo sistema de irrigação.

Plantas que exploram um maior volume de solo em extensão e, principalmente, em profundidade, possuem também uma maior disponibilidade hídrica e são capazes de transpirar potencialmente com um maior intervalo entre duas irrigações. Elas também são capazes de tolerar um maior período de deficiência hídrica comparadas a plantas que exploram o solo superficialmente. A condutividade hidráulica da planta também é muito importante para as relações hídricas. Plantas que possuem baixa condutividade hidráulica podem não conduzir água suficiente para atender a uma elevada demanda atmosférica, podendo ocorrer nesse caso a regulação estomática para a manutenção do balanço de água adequado para o vegetal. É o exemplo de plantas cítricas, que possuem baixa condutividade hidráulica e eficiente regulação estomática à difusão de vapor (KRIEDMANN; BARRS, 1981).

Outra característica importante para o balanço hídrico da planta é a relação existente entre raiz e parte aérea da planta (raiz/copa). Quanto menor a relação, maior será a incapacidade de transportar água para a copa da planta em dias com elevada demanda atmosférica. Essa característica é muito importante para cultivos de sequeiro, pois, quanto maior a relação raiz/copa, maior sua capacidade de tolerar os períodos de deficiência hídrica. Teoricamente, em razão de o suprimento hídrico ser contínuo, em cultivos irrigados a planta não necessita gastar energia para aumento e manutenção de sistema radicular. Porém, uma maior relação pode garantir a sobrevivência ou impedir que a planta sofra deficiência, caso ocorra falha no sistema de irrigação e este não funcione por determinado período.

As relações abordadas são muito importantes e o seu efeito pode ser visualizado no campo, a exemplo de plantas de mamão, que, mesmo com um bom suprimen-

to hídrico, murcham em dias com elevada demanda atmosférica, como verificado por Silva et al. (2003). Nesse caso, esse comportamento reflete, possivelmente, uma combinação de fatores, por ser uma cultura herbácea com elevada condutividade hidráulica (COELHO FILHO et al., 2003; MARLER et al., 1994) e baixa relação raiz-copa, combinada à possível incapacidade do solo de conduzir água na velocidade que atenda à demanda da planta. Em plantas adultas de citros, que possuem elevada superfície foliar (COELHO FILHO et al., 2003; SYVERTSEN; LLOYD, 1994) e, conseqüentemente, uma baixa relação raiz-copa, em dias com elevada energia radiante (saldo de radiação  $> 16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), a absorção energética da árvore é elevada, mas a capacidade de suprimento de água pelo sistema radicular não é suficiente para atender à demanda atmosférica. Em plantas jovens de citros, mesmo em condições de elevada disponibilidade energética, acima de  $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , a maior relação raiz-copa (CASTEL, 1978) pode explicar a razão de não ocorrer a queda da transpiração em elevada disponibilidade energética (Figura 8).

## Indicadores vegetais do grau de deficit hídrico

Existem vários indicadores do estado hídrico das plantas, como os baseados em variáveis físico-hídricas do solo, o seu potencial mátrico e a variação do conteúdo de água disponível. Nas últimas décadas, tem-se dado considerável atenção ao uso de indicadores da própria planta, pois, segundo Kramer e Boyer (1995), as próprias plantas são os melhores indicadores da disponibilidade hídrica ao integrarem todos os fatores que afetam o seu grau de hidratação. Muitos acreditam que os índices das plantas são os mais confiáveis, considerando-se que o solo é apenas um indicador indireto. Porém, as variáveis medidas diretamente na planta mostram-se muito sensíveis a fatores ambientais e a resposta ao estresse pode ser mal-interpretada, indicando apenas um deficit hídrico temporário, resultante do desequilíbrio existente entre a transpiração e a absorção radicular.

A seguir, esses indicadores serão discutidos de forma sucinta.

### Potencial da água na folha

Entre os métodos usados para a determinação do potencial da água na planta, destacam-se os baseados no equilíbrio de vapor (técnicas psicrométrica e higrométrica) e o da câmara de pressão. Uma das vantagens da câmara de pressão é a possibilidade de estudos de curva pressão-volume, permitindo o estudo deta-

lhado das relações hídricas do tecido vegetal com a construção do diagrama de Höfler (Figura 2), a determinação da fração da água apoplástica e simplástica do tecido, dos potenciais na turgescência plena e turgescência zero, do módulo de elasticidade da parede celular e do possível mecanismo de ajustamento osmótico da planta.

Entretanto, para uso no campo e determinação direta do grau de deficit hídrico das plantas, como se exige na irrigação, esses métodos possuem suas limitações, e uma série de cuidados relevantes devem ser levados em conta no processo de coleta, armazenamento, avaliação e análise dos resultados, como abordado por Boyer (1995). Especialmente para plantas de grande porte, com grande quantidade de folhas, a variabilidade temporal e espacial do potencial da água na folha, em virtude da maior ou menor exposição à radiação solar coletada durante o período diurno, dificulta a tomada de decisão quanto à amostragem a ser realizada.

Conforme explicado anteriormente, os órgãos vegetais mais usados para a determinação do potencial da água são as folhas ( $\psi_F$ ) e os ramos ( $\psi_R$ ). Contudo, Jones (1992), com base em resultados experimentais, afirma que a folha pode não ser o local mais apropriado de se determinar o potencial numa planta, porque: a) o potencial da água na folha sofre variações em curta escala de tempo, dependendo das condições ambientais, com o aumento e a diminuição da irradiância solar em decorrência da passagem temporária de nuvens; b) em alguns casos, o potencial da água pode ser mais elevado em plantas submetidas a uma maior secagem do solo que em plantas com água facilmente disponível no solo em razão da regulação estomática; nesse caso, o fechamento estomático não pode ser explicado pela deficiência hídrica na folha regulada pelo mecanismo de realimentação (*feedback*), e sim pela resposta às condições hídricas do solo, ligada ao transporte hidráulico de sinais (ABA) do sistema radicular para as folhas; c) em experimentos envolvendo a subdivisão do sistema radicular de plantas, tem-se verificado que é possível a manutenção do estado hídrico da folha ao deixar parte do sistema radicular da planta com água facilmente disponível e outra porção sofrendo estresse pela seca; nesta última condição, os estômatos podem permanecer fechados ou o crescimento da planta pode ser inibido; d) experimentos têm demonstrado que o comportamento estomático é mais relacionado com o estado hídrico do solo do que com o potencial da água na folha durante o período diurno.

Alguns resultados demonstram que as medidas realizadas em ramos ( $\psi_R$ ) são mais consistentes que as realizadas em folha no período diurno, representando melhor o estado hídrico da planta em razão das variações micrometeorológicas ao longo do dia (deficit de pressão de vapor e radiação solar absorvida), sendo

mais sensíveis a níveis de irrigação aplicados (NAOR, 1998) que os potenciais da água da folha. Entre muitos, os resultados de Choné et al. (2001) para videiras, MacCutchan e Shackel (1992) para ameixeira e Naor et al. (1995) para macieira revelaram que o  $\psi_R$  correlacionou-se melhor com a transpiração e com a condutância estomática do que o  $\psi_F$ .

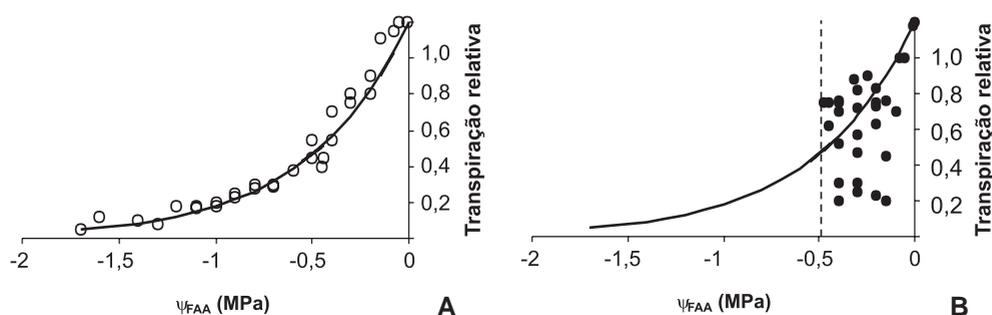
Quando se trabalha com o  $\psi_F$ , as dificuldades de interpretação dos seus valores, mesmo quando estes são determinados no meio do dia, período no qual as variações ambientais são menores que no início da manhã ou final da tarde, têm levado à preferência pela utilização do potencial da água na folha determinada antes do amanhecer,  $\psi_{FAA}$  *pré-dawn leaf water potential*. Este é considerado por muitos o melhor indicador para caracterizar o estado hídrico da planta, pois no horário de medida não há transpiração, os gradientes do potencial da água na planta são pequenos e o  $\psi_{FAA}$  é representativo das condições hídricas do solo (AMEGLIO et al., 1999). Entretanto, alguns resultados, como os observados por Choné et al. (2001) em videiras, têm demonstrado que a sensibilidade para detectar o déficit de água na planta pode ser maior ao se determinar o potencial da água ao meio-dia quando as medidas são realizadas em ramos ( $\psi_R > \psi_{FAA} > \psi_L$ ).

Em estudos realizados com culturas anuais e perenes, têm-se encontrado bons resultados com a utilização do  $\psi_{FAA}$  como índice de deficiência hídrica da planta, o qual se tem correlacionado bem com a transpiração relativa (*TR*) – razão entre a transpiração atual e a máxima. Em muitos dos trabalhos envolvendo fruteiras, a transpiração relativa determinada em campo é obtida com o auxílio de métodos envolvendo o fornecimento de calor no tronco ou ramos das plantas, como o da sonda de dissipação térmica (GRANIER, 1985), o balanço de calor (SAKURATANI, 1981) e o de pulso de calor (COHEN et al., 1981), que têm auxiliado a modelagem da transpiração e permitido grandes avanços nos estudos de relações hídricas. Resultados de Valancogne et al. (1996), com seis espécies frutíferas cultivadas em locais distintos, demonstraram que, ao padronizar os valores máximos do  $\psi_{FAA}$  como uma função de *TR* versus  $\psi_{FAA}$ , é possível utilizar *TR* como indicador de deficiência hídrica em manejo de irrigação.

Porém, existem casos em que o  $\psi_{FAA}$  não se correlaciona com o potencial da água no solo na zona radicular da cultura, como é esperado. Resultados observados por Ameglio et al. (1999) demonstram que o  $\psi_{FAA}$  não é um bom índice de estresse para plantas cultivadas em solos apresentando heterogeneidade de umidade, particularmente quando somente uma pequena parte do solo contém água facilmente disponível, como pode ocorrer quando se irriga por gotejamento e microaspersão (Figura 10). Verifica-se que o  $\psi_{FAA}$  e a *TR* se correlacionam bem

quando o solo é umedecido uniformemente, e se mantém em valores mais altos quando o solo é irrigado de maneira heterogênea, mesmo com o decréscimo acentuado da transpiração das plantas em deficit hídrico. Esse comportamento pode estar ligado ao envio de sinais das raízes localizadas em zonas mais secas do solo para as copas das plantas, promovendo o fechamento estomático e a manutenção dos potenciais da água nas folhas acima dos valores esperados, mesmo estando as plantas em deficit hídrico.

Nesses casos, o  $\psi_{FAA}$  não pode ser utilizado como índice de deficit hídrico da planta e a transpiração relativa é o melhor indicador desse deficit.



**Figura 10.** Relação entre transpiração relativa e potencial da água na folha antes do amanhecer ( $\psi_{FAA}$ ) em árvores de noqueira: solos com distribuição homogênea de água (A); solos com distribuição heterogênea de água (B).

Fonte: adaptado de Améglio et al. (1999).

## Transpiração e condutância foliar à difusão de vapor

A transpiração e a resistência foliar à difusão de vapor são variáveis utilizadas em estudos fisiológicos de relações hídricas como índices de estresse de uma cultura para o manejo de irrigação. Plantas estressadas aumentam a resistência à difusão de vapor e transpiram menos por unidade de área foliar.

Existem vários fatores que afetam a abertura estomática, como a idade da folha, a luminosidade, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, o vento, o potencial da água na folha, a disponibilidade hídrica do solo e o possível transporte de substâncias das raízes para partes aéreas das plantas, quando há existência de deficiência de água no solo. Esses fatores dificultam a interpretação dos valores e sua relação com o balanço hídrico da planta. A existência e atuação desses fatores

separadamente ou de forma integrada dificultam o uso da condutância estomática como indicador de déficit hídrico (ANGELOCCI, 2002).

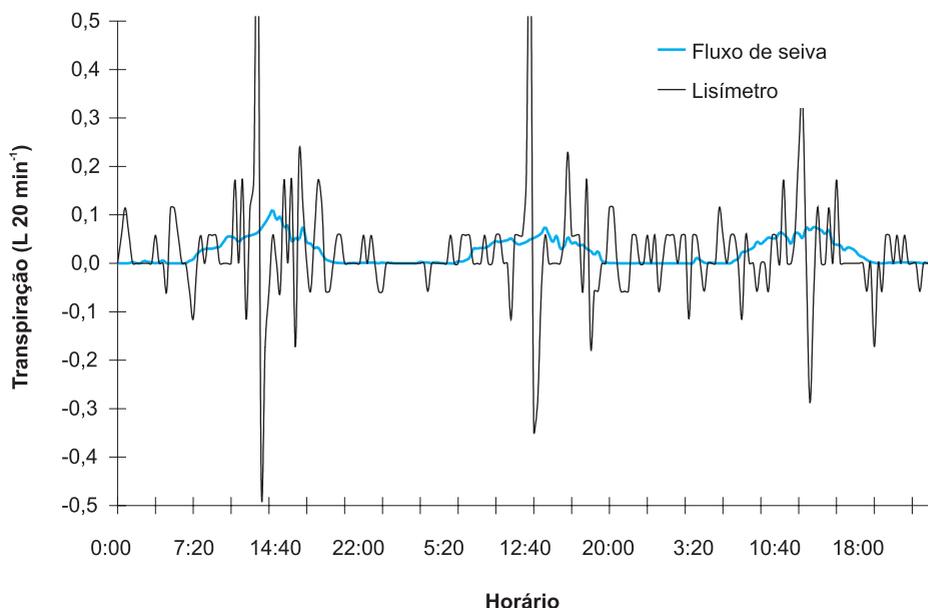
Existem muitas técnicas utilizadas para a determinação da transpiração em plantas, como a gravimétrica ou a de inserção da planta inteira ou folhas em uma câmara gasométrica (ANGELOCCI, 2001). Quando se trabalha com a planta inteira, a técnica gravimétrica pode ter alta exatidão e precisão, sendo o princípio, por exemplo, dos lisímetros de pesagem. A técnica lisimétrica é considerada como boa referência para a determinação do consumo de água pelas plantas, entretanto, ao se trabalhar com árvores de grande porte, ocorre limitação do seu emprego, pelo elevado custo do equipamento, pelas dificuldades de instalação e pelas limitações metodológicas de representatividade e qualidade das leituras (GREBET; CUENCA, 1991; HOWELL et al., 1995; JENSEN et al., 1990; WRIGHT, 1991).

Boa parte dos estudos de transpiração de espécies herbáceas e arbóreas no campo vem sendo realizada por técnicas de fornecimento de calor ao caule, já citadas. Essas técnicas não causam distúrbios ao sistema radicular e folhas, perturbando pouco o caule, se corretamente aplicadas. Quando bem utilizadas, permitem o acompanhamento quase que instantâneo do fluxo de água por meio da secção de caule ou tronco em que se realiza a medida, por apresentarem boa resposta dinâmica. Exemplificando, resultados de pesquisas apontam como sendo entre 5 e 20 minutos a resposta dinâmica do método do balanço de calor em espécies herbáceas (BAKER, BAVEL, 1987) e lenhosas (CERMARK et al., 1984; OLIVEIRA, 1997; STEINBERG et al., 1989; TREJO-CHANDIA et al., 1997).

Ao utilizar essas técnicas, a transpiração corresponderá ao fluxo de seiva acumulado no período de 24 horas, minimizando o efeito das defasagens que ocorrem, principalmente, em plantas com elevada capacitância (Figura 3). Entretanto, deve haver cautela na utilização dessas técnicas, somente as utilizando com pleno conhecimento de como minimizar suas fontes de erro e, também, se elas são aplicáveis à espécie estudada.

Ao comparar a transpiração obtida com o uso de lisímetro de pesagem e do fluxo de seiva determinado e a com o uso do método do balanço de calor no caule, em plantas jovens de lima ácida 'Tahiti' em campo, Coelho Filho (2002) verificou para 4 dias (Figura 11) que a transpiração diária foi muito próxima dos valores diários acumulados de fluxo de seiva. As medidas de fluxo de seiva apresentam-se coerentes ao longo dos 3 dias, com valores positivos e crescentes, até os horários de maior demanda do dia, com redução no período da tarde. Diferentemente, os lisímetros apresentaram grandes oscilações ao longo do dia, inclusive com valores, muitas vezes, altamente negativos. A elevada variabilidade pontual das medidas

de transpiração nos dois lisímetros implica valores grosseiramente diferentes dos determinados pelo método do balanço de calor. Essas divergências podem ser atribuídas ao efeito da ação do vento e à elevada rugosidade da cultura, impedindo as comparações entre as duas metodologias em escala inferior a 24 horas (COELHO FILHO, 2002).



**Figura 11.** Curso da transpiração medida em um lisímetro de pesagem e do fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor no caule de plantas de lima ácida 'Tahiti', nos dias julianos 329, 330 e 331 do ano de 2001, em Piracicaba, SP.

Fonte: Coelho Filho (2002).

A técnica de câmaras gasosas apresenta a desvantagem de causar distúrbios no ambiente em torno da folha, o que interfere nas medidas. O princípio dessa técnica é utilizado nos porômetros e analisadores gasosos por infravermelho, equipamentos extensivamente usados atualmente, que possibilitam as medidas de condutância estomática e transpiração. Além da interferência na medida, causada pela inserção das folhas na câmara gasométrica, a técnica porométrica, por exemplo, apresenta problemas de ordem prática, como impossibilidade de automação das medidas e de representatividade das leituras, principalmente quando se está fazendo medidas em plantas com elevada superfície foliar, o que favorece o aumento da variabilidade espacial e temporal das leituras.

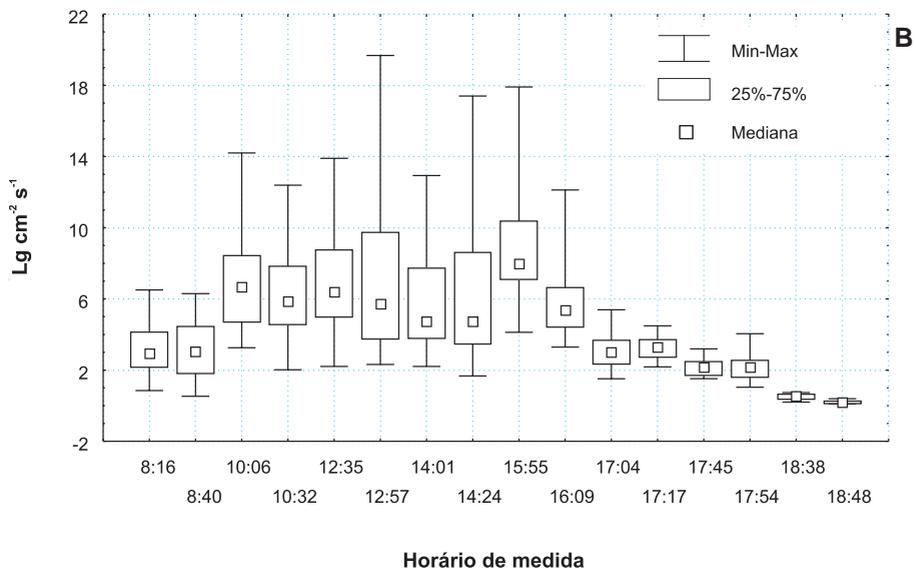
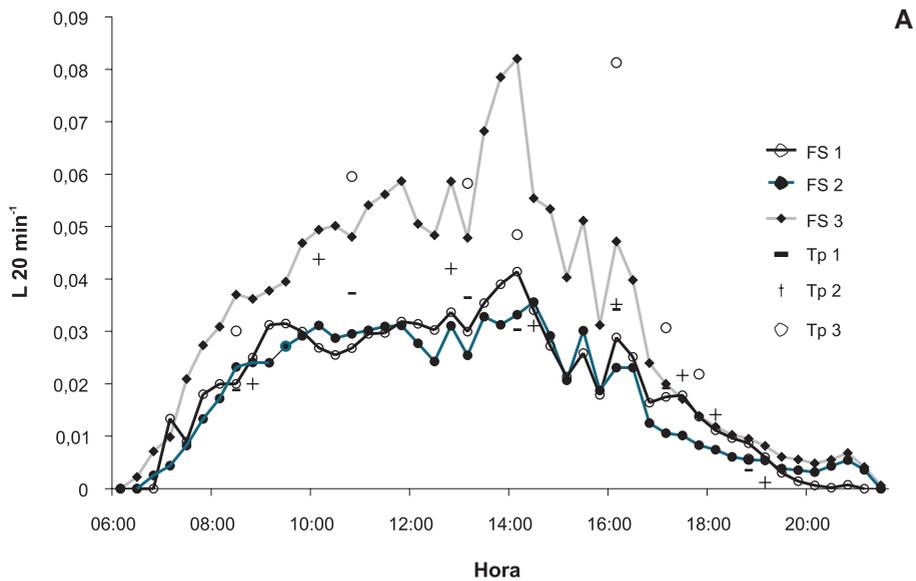
Para fins comparativos em medidas no campo, é desejável que as leituras porométricas sejam realizadas em dias completamente limpos, evitando-se que a passa-

gem de nuvens torne comparativamente incompatíveis as leituras realizadas em plantas diferentes. Os horários em que são realizadas as leituras também afetam a variabilidade. Geralmente, em horários de pico energético, a variabilidade das leituras é maior e conseqüentemente menor será a sua representatividade, como se verifica na Figura 12. A época do ano interfere no comportamento relativo da abertura estomática de folhas de sol e sombra. Para a cultura da lima ácida 'Tahiti', foram observadas maiores condutâncias no verão para folhas de sol e valores muito próximos no outono e inverno, podendo ser explicados pelas baixas temperaturas do ambiente (que afetaram a absorção radicular) e pelos elevados deficits de saturação de vapor em agosto, conduzindo à diminuição da abertura estomática.

## Variações micromorfológicas de órgãos vegetais

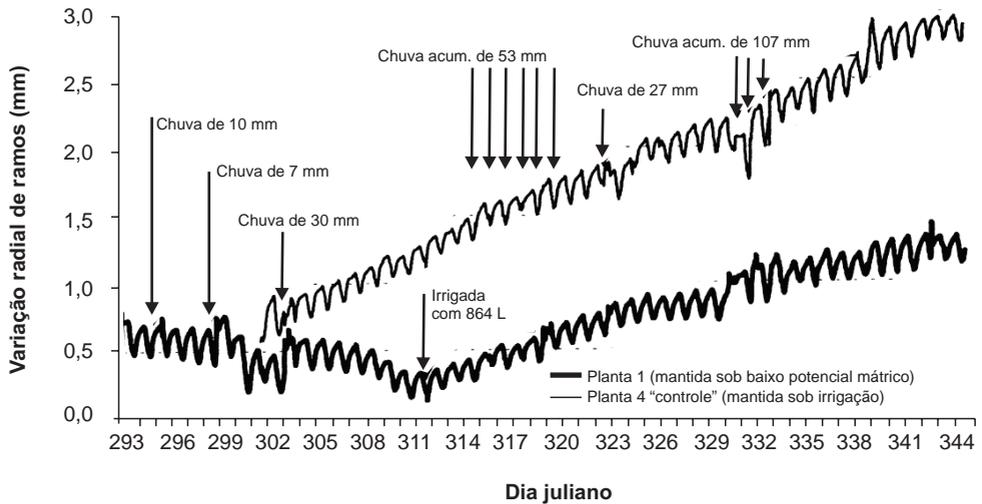
Os estudos envolvendo a variação do crescimento e turgescência vegetal é mais uma maneira de detectar o deficit hídrico das plantas. Como verificado na Figura 12, ao longo de um dia, o balanço de água na planta pode ser positivo ou negativo, dependendo do horário e da capacidade de armazenar água nos tecidos (capacidade hídrica). Quando não há limitação de água no solo, a planta transpira potencialmente e, ao longo da fase clara do dia, o balanço hídrico é negativo, havendo contração dos caules, ramos ou frutos; porém, com a reposição hídrica noturna, observam-se valores absolutos superiores aos encontrados no início da manhã anterior em virtude do crescimento das plantas. Quando há limitação hídrica no solo, a reposição noturna de água na planta não é completa e as variações micrométricas dos órgãos das plantas diferenciam-se das observadas para as plantas sem deficiência hídrica (Figura 13).

A técnica de detecção de variações micrométricas de órgãos das plantas por dendrometria de elevada sensibilidade e resolução (10  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ) é suficiente para quantificar essas variações no balanço de água da planta, permitindo a visualização da variação diária e o acompanhamento simultâneo das variações em órgãos de plantas diferentes, e comparar com as variações dos elementos meteorológicos. Segundo Delgado Rojas (2003), um ponto desfavorável da técnica é que a representatividade da medida como indicador de deficit hídrico da planta não é universal, devendo ser determinada para a espécie em estudo a partir da sua relação com outros indicadores, como o potencial da água, a resistência estomática à difusão de vapor d'água, a transpiração da planta, e até mediante o uso de



**Figura 12.** Curso diário do fluxo de seiva ( $L\ 20\ min^{-1}$ ) determinado pelo método do balanço de calor no caule e da transpiração ( $L\ 20\ min^{-1}$ ) determinada com o uso de porômetro de equilíbrio dinâmico, em três plantas de lima ácida 'Tahiti' em campo (A); e medidas de transpiração em folhas de lima-ácida 'Tahiti' em campo ao longo de um dia (B). Dezembro de 2001, Piracicaba, SP.

Fonte: Coelho Filho (2002).



**Figura 13.** Variação radial de ramo de duas árvores de lima-ácida 'Tahiti' ao longo dos dias julianos 293 a 344 do ano de 2002, Piracicaba, SP.

Fonte: Delgado Rojas (2003).

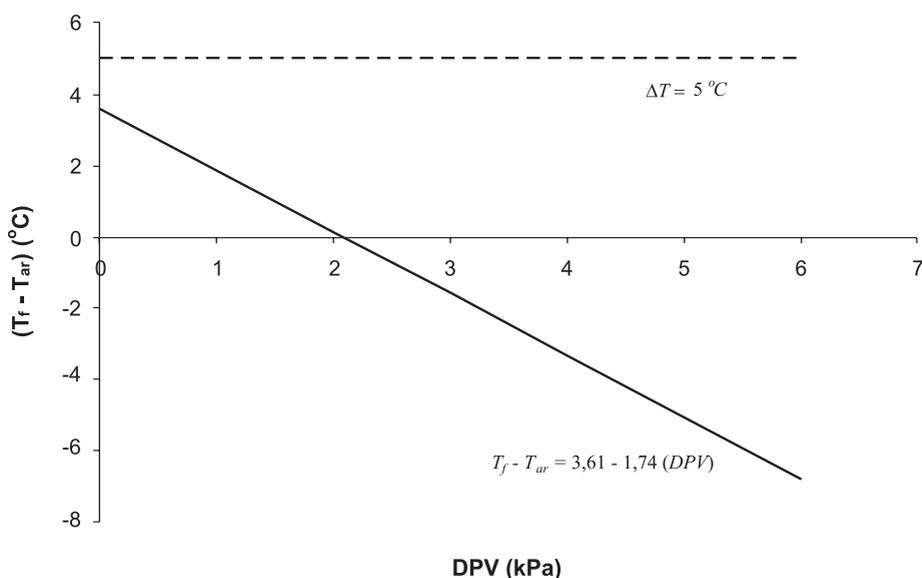
índices indiretos, como o potencial da água no solo (potencial mátrico). Somente com base nos estudos comparativos envolvendo plantas com e sem deficiência hídrica, é possível se estabelecerem os critérios sobre como a variação de diâmetro pode ser utilizada como indicador do momento da irrigação.

## Diferença de temperatura folha-ar

A temperatura da folha é dependente do seu balanço de energia. Uma folha absorve parte da radiação de ondas curtas (solar) e quase toda a radiação de ondas longas (infravermelha térmica) do ambiente, representando os seus ganhos energéticos. Ela armazena um valor relativamente desprezível dessa energia (principalmente de forma metabólica, como na fotossíntese) e dissipa energia na forma de emissão radiante (infravermelha térmica), de calor latente de vaporização (transpiração) e de convecção/condução de calor, tendendo a manter-se em equilíbrio térmico com o meio. Quando a planta está em boa disponibilidade hídrica, boa parte do calor é dissipada na forma de calor latente de evaporação (transpiração), promovendo o resfriamento da superfície foliar. Quando há limitação no fornecimento hídrico e a planta entra em déficit, diminui o calor dissipado pela transpiração, tendendo ao aumento da temperatura foliar até um valor máximo obtido quando a planta está em máxima deficiência hídrica, aumentando proporcionalmente os processos de condução/convecção de calor (calor sensível). Desse modo, a temperatura da folha, ou mais especificamente, a diferença

entre sua temperatura e a do ambiente é reconhecidamente um indicador de deficit hídrico da planta.

A relação entre o grau de deficit hídrico e a diferença térmica entre folha e ambiente não é simples, pois o balanço global de energia da folha depende de variáveis como o deficit de pressão de vapor d'água do ar, o saldo de radiação e a velocidade do vento, o que exige que sejam encontradas relações entre essas variáveis. A Figura 14, por exemplo, apresenta a relação entre a diferença de temperatura entre folha e ar, associada à variação do deficit de pressão de vapor do ar ( $DPV$ ), as quais mostram uma relação linear quando ocorre transpiração potencial (sem estresse hídrico), sendo denominadas de "linhas-base" *baselines*, permitindo o cálculo de um índice denominado de "graus-dia de estresse hídrico" (IDSO et al., 1977, 1981, 1982). Índices correlatos, mas que levam em conta efeitos, por exemplo, da velocidade do vento, são usados como o índice de estresse hídrico da cultura (*IEHC*), tratado teoricamente por Jackson (1982).



**Figura 14.** Relação entre temperatura do dossel vegetativo ( $T_f$ ), temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e deficit de pressão de vapor ( $DPV$ ) em plantas de lima em deficiência hídrica (linha tracejada) e sem deficiência hídrica ("linha-base" sem estresse).

Fonte: adaptado de Sepaskhah e Kashefipour (1994).

A temperatura do dossel vegetativo pode ser obtida com o uso de pequenos termopares aderidos a número representativo de folhas da planta avaliada, procedimento que é inviabilizado na prática quando a planta possui elevada área foliar. De maneira geral, os estudos são realizados com o uso de termômetro por detec-

ção de infravermelho, que mede a temperatura do dossel à distância, ou seja, a temperatura radiante, sendo necessários cuidados com o uso dessa técnica para que sejam obtidas medidas representativas.

## Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome, IT: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMEGLIO, T.; ARCHER, P.; COHEN, M.; VALANCOGNE, C.; DAUDET, F.; DAYAU, S.; CRUIZIAT, P. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. **Plant and Soil**, Petrória, v. 207, p. 155-167, 1999.
- ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**. Piracicaba: Ed. do autor, 2002. 268 p.
- ANGELOCCI, L. R. **Métodos e técnicas de estudo das relações água-planta-atmosfera**. Piracicaba: ESALQ-USP, 2001. 104 p.
- ANGELOCCI, L. R.; NOVA, N. A. V.; COELHO FILHO, M. A. Relações entre o saldo de radiação na copa da árvore e a irradiância solar global em pomar de lima ácida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBA, 2001. p. 817-818.
- ANGELOCCI, L. R.; VALANCOGNE, C. Leaf area and water flux in apple trees. **Journal of Horticultural Science**, Ashford Ken, v. 67, n. 2, p. 299-307, 1993.
- BAKER, J. M.; BAVEL, C. H. M. van. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 10, p. 777-782, 1987.
- BARRS, H. D. Comparison of x-ater potentials in leaves as measured by tN-o types of thermocouple psychrometer. **Australian Journal of Biological Sciences**, Victoria, v. 18, p. 36-52, 1965.
- BASSOI, L. H.; ALENCAR, C. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Root distribution analysis of date palms and soil water dynamics analysis in northeastern Brazil as a guide to irrigation depth. In: INTER REGIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT-WATER: INNOVATIVE ISSUES IN IRRIGATION AND DRAINAGE, 1., 1998, Lisboa. **Additional Papers...** Lisboa: ICID, 1998, p. 342-349.
- BASSOI, L. H.; FLORI, J. E.; ALENCAR, C. M.; RAMOS, C. M. C. Distribuição espacial do sistema radicular da pupunheira em solos irrigados no Vale do São Francisco. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 163-176, 1999.
- BASSOI, L. H.; FLORI, J. E.; SILVA, E. E. G.; SILVA, J. A. M. Guidelines for irrigation scheduling of peach palm for heart-of-palm production in the São Francisco Valley, Brazil. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v.21, n.4, p. 683-687, 2003a.
- BASSOI, L. H.; GRANGEIRO, L. C.; SILVA, J. A. M.; SILVA, E. E. G. Root distribution of irrigated grapevine rootstocks in a coarse texture soil of the São Francisco Valley, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 35-38, 2002a.
- BASSOI, L. H.; RESENDE, G. M.; FLORI, J. E.; SILVA, J. A. M.; ALENCAR, C. M. Distribuição radicular de cultivares de aspargo em áreas irrigadas de Petrolina-PE. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, n. 1, p. 17-24, 2001.
- BASSOI, L. H.; CARVALHO, A. M. Lixiviação de macronutrientes em um solo cultivado com milho com e sem irrigação suplementar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 283-287, 1992.

- BASSOI, L. H.; HOPMAMS, J. W.; JORGE, L. A. C.; ALENCAR, C. M.; SILVA, J. A. M. Grapevine root distribution for drip and microsprinkler irrigation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 377-387, 2003b.
- BASSOI, L. H.; REICHARDT, K. Lixiviação de nitrato em terra roxa estruturada latossólica cultivada com milho fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 329-335, 1995.
- BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. C.; SILVA, J. A. M.; SILVA, E. E. G.; RAMOS, C. M. C.; TARGINO, E. L.; MAIA, J. L. T.; FERREIRA, M. N. L.; SEDIYAMA, G. Parâmetros para o manejo de irrigação da bananeira no Vale do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002b. 1 CD-ROM.
- BEN-ASHER, J.; LOMEN, D. O.; WARRICK, A. W. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 3-6, 1978.
- BERNARDES, M. S.; GOUDRIAAN, J.; CÂMARA, G. M. S.; DOURADO NETO, D. Interações acima e abaixo da superfície do solo em sistema agrolorestal (*Hevea brasiliensis*) e soja (*Glycine Max*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA, 1997. p. 549-551.
- BERNARDES, M. S.; LIMA, S. F. F. Densidade populacional, disposição e direção de linhas de plantio, manejo da copa: a luz como fator essencial. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM RELAÇÕES SOLO-PLANTA-ATMOSFERA. Piracicaba: ESALQ, 2000. 55 p.
- BOYER, J. S. **Measuring the water status of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 178 p.
- BOYER, J. S. Photosynthesis at low water potentials. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, GB, v. 273, p. 501-512, 1976.
- BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN-ASHER, I.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source: I. mathematical models. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 35, p. 675-682, 1971.
- BRAUN, P.; MAURER, B.; HEINEMANN, G. Scaling transpiration in apple orchards: meteorological versus plant based physiological measurements. **Acta Horticultural**, The Hague, v. 537, p. 45-51, 2000.
- BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 1, p. 3-17, 1978.
- BRESLER, E.; RUSSO, D. Two-dimensional transport of solutes during nonsteady infiltration from a trickle source. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 39, p. 604-613. 1975.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H. A.; WILKES, J. O. **Applied numerical methods**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 625 p.
- CARVALHO, R. I. N. Fisiologia de produção de espécies frutíferas. In: WACHOWICZ, C. M.; CARVALHO, R. I. N. **Fisiologia vegetal: produção e pós-colheita**. Curitiba: Champagnat, 2002. p.135-181.
- CASTEL, W. A. Citrus root systems: their structure, function, growth, and relationship to tree performance. **Proceedings of the International Society of Citriculture**, Tokyo, JP, v. 62, p. 62-69, 1978.
- CERMAK, J.; KUCERA, J.; ZIDECK, V. Xylem water flow in crack willow tree (*Salix fragillis* L.) in relation to diurnal changes of environment. **Oecologia**, Berlim, DE, v. 64, p. 145-151, 1984.
- CHONÉ, X.; LEEUWEN, C. van; DUBOURDIEU, D.; GAUDILLÈRE, J. P. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. **Annals of Botany**, London, GB, v. 87, p. 477-483, 2001.

CHOUDHURY, E. N.; MILLAR, A. A.; CHOUDHURY, M. M.; ABREU, T. A. S. Diferentes níveis de irrigação na produção e sistema radicular do tomateiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, n. 4, p. 475-480, 1980.

CHOUDHURY, E. N.; MORGADO, L. B.; ANJOS, J. B. **Efeito do manejo do solo na compactação e produção de melancia irrigada**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1986. 24 p. (Boletim de pesquisa, 29).

CINTRA, F. L. D.; LEAL, M. L. S.; PASSOS, E. E. M. **Avaliação da distribuição do sistema radicular de coqueiros anões**. Aracaju: EMBRAPA-CNPACO, 1992. 8 p. (Comunicado técnico, 36).

COELHO FILHO, M. A. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.) e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2002. 91 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

COELHO FILHO, M. A.; CASTRO NETO, M. T.; COELHO, E. F. Transpiração máxima de plantas de mamão (Carica Papaya L.) em pomar fertirrigado, nas condições de Cruz das Almas BA. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003. Juazeiro. **Anais...** Viçosa: ABID, 2003. 1 CD-ROM.

COELHO, E. F.; ALVES, A. A. C.; LORDELO, C. M. M.; QUEIROZ, J. S. Produção do mamoeiro cultivar Tainung nº 1 sob diferentes regimes de irrigação em condições semi áridas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém **Anais...** Belém: SBF, 2002. 1 CD-ROM.

COELHO, E. F.; OLIVEIRA, F. C.; ARAÚJO, E. C. E.; VASCONCELOS, L. F. L.; LIMA, D. M. Distribuição do sistema radicular da mangueira sob irrigação localizada em solo arenoso de tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 250-256, 2001.

COELHO, E. F.; OLIVEIRA, F. das C. O.; ARAÚJO, E. C. E.; VASCONCELOS, L. F. L. Distribuição de raízes de laranja 'Pera' sob sequeiro e irrigação por microaspersão em solo arenoso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 5, p. 603-611, 2002.

COELHO, E. F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v. 60, p. 1039-1049, 1996.

COELHO, E. F.; SANTOS, M. R.; COELHO FILHO, M. A. Distribuição de raízes de mamoeiro sob diferentes sistemas de irrigação em solos de Tabuleiros Costeiros. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. **Anais...** Juazeiro: ABID, 2003. 1 CD ROM.

COHEN, Y; FUCHS, M.; GREEN, G. C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 4, p. 391-397, 1981.

CORREA, L. S. **Distribuição do sistema radicular de cultivares de abacateiro (Persea spp.) num solo podzólico vermelho amarelo**. 1982. 45 f. Tese (Doutorado em Solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

DELGADO ROJAS, J. S. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110 f. Tese (Doutorado em agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo Piracicaba.

DENMEAD, O. T.; SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 45, p. 385-390, 1962.

DIRKSEN, C. **Soil physics measurements**. Reiskirchen: Catena Verlag, 1999. 154 p.

DOMINGO, R.; RUIZ-SÁNCHEZ, M. C.; SÁNCHEZ-BLANCO, M. J.; TORRECILLAS, A. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. **Irrigation Science**, New York, v. 16, p. 115-123, 1996.

FONSECA, N. **Paclobutrazol e estresse hídrico no florescimento e produção da mangueira (*Mangifera indica* L.) 'Tommy Atkins'**. 2002. 117 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras

GARDNER, W. R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. **Soil Science**, Baltimore, v. 85, p. 228-232, 1958.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; CASTEL, J. R. Regulated deficit irrigation in 'Clementin a Nules' citrus tree. I Yield nad fruit quality effects. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford Kent, v. 74, n. 6, p. 706-713, 1999.

GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestiers**, Nancy, v. 42, p.193-200, 1985.

GREBET, P.; CUENCA, R. H. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 11-18.

HEALY, R. W.; WARRICK, A. W. A generalized solution to infiltration from a surface point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1245-1251, 1988.

HO, L. M. The physiological basis for improving dry matter content and calcium status in tomato fruit. **Journal Applied Agricultural Research**, [S. l.], n. 3, p. 275-281, 1988.

HONERT, T. H. van der. Water transport in plants as a catenary process. **Discussions of the Faraday Society**, London, GB, v. 3, n. 3-4, p. 146-153, 1948.

HOWELL, T. A.; SCHINEIDER, A. D.; DUSEK, D. A.; MAREK, T. H.; STEINER, J. L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

IDSO, S. B. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, NL, v. 27, p. 59-70, 1982.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER JUNIOR, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, NL, v. 24, p. 45-55, 1981.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; REGINATO, R. I. Remote sensing of crop yields. **Science**, Washington, DC, v. 196, p. 19-25, 1977.

JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D. **Advance in irrigation**. New York: Academic Press, 1982, v. 1, p. 43-85.

JARVIS, N. J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, NL, v. 107, p. 57-72, 1989.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

JONES, H. G. **Plants and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. New York: Cambridge University Press, 1992. 428 p.

JONES, H. G.; LAKSO, A. N.; SYVERTSEN, J. P. **Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees**. Horticultural Reviews, Westport, v. 7, p. 301-344, 1985.

JONES, H. G.; TARDIEU, F. Modelling water relations of horticultural crops: a review. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, NL, v. 74, p. 21-46, 1998.

- KOIDE, R. T.; ROBICHAUSX, R. H.; MORSE, S. R.; SMITH, C. M. Plant water status, hydraulic resistance and capacitance. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (Ed.). **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London, GB: Chapman & Hall, 1989. p. 161-183.
- KRAMER, P. J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. 489 p.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.
- KRAMER, P. J.; KOZLOWSKI, T. T. **Physiology of wood plants**. Orlando: Academic Press, 1979. 811 p.
- KRIEDMANN, P. E.; BARRS, H. D. Citrus orchards. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed). **Water deficits and plant growth**. London, GB: Academic Press, 1981. p. 325-417.
- KUTILEK, M.; NIELSEN, D. R. **Soil hydrology**. Cremlingen: Catena-Verlag, 1994. 370 p.
- LAFOLIE, F.; GUENNELON, R.; GENUCHTEN, M. T. Van. One-dimensional solute transport modelling in aggregated porous media Part 1. Model description and numerical solution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1318-1323, 1989.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Barcelona: Omega, 1977. 305 p.
- LEVITT, J. Resistance to water transport in plants. **Nature**, London, GB, v. 212, p. 527, 1966.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Ed. do autor, 1995. 497 p.
- LOMEN, D. O.; WARRICK, A. W. Time-dependent linearized infiltration: II. Line sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 38, p. 568-572, 1974.
- MACHADO, C. C. **Influência da irrigação localizada na absorção de água do porta-enxerto limão "Cravo" em plantas adultas de lima ácida "Tahiti"**. 2000. 92 f. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 219-226, 2001.
- MARLER, T. E.; GEORGE, A. P.; NISSEN, R. J.; ANDERSON, P. C. Miscellaneous tropical fruits. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. C. (Ed). **Handbook of environmental physiology of fruit crops volume II: sub-tropical and tropical crops**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 189-224.
- NAOR, A. Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody species. **Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, Ashford Kent, v. 73, p. 431-436, 1998.
- NAOR, A.; KLEIN, I.; DORON, I. Stem water potential and apple fruit size. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Stanford, v. 120, p. 577-582, 1995.
- NEUMAN, S. P.; FEDDES, R. A.; E.; BRESLER, E. Finite element analysis of two dimensional flow in soil considering water uptake by roots: I. theory. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, p. 224-230, 1975.
- NEVES, C. S. V. J.; BORGES, A. V.; KANAI, H. T.; PRETE, C. E. C.; PIPOLO, V. C. Distribuição do sistema radicular de cultivares de aceroleira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 112-115, 2001.
- NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. San Diego: Academic Press, 1999.

OLIVEIRA, R. F. de. **Desenvolvimento e análise de desempenho de um sensor de fluxo para avaliação de transpiração vegetal pelo método de balanço de calor**. 1997. 73 f. Tese (Livro-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

OR, D.; WRAITH, J. M. **Agricultural and environmental soil physics**. Logan: Utah State University, 1997. 218 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Piracicaba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PHILIP, J. R. General theorem on steady state infiltration from surface sources, with application to point and line sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, p. 867-871, 1971.

PHILIP, J. R.; KNIGHT, J. H. Redistribution of soil water from plane, line, and point sources. **Irrigation Science**, New York, v. 12, p. 169-180, 1991.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: Edur, 1998. 150 p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP-ESALQ-Depto Física e Meteorologia, 1996. 505 p.

RISSE, L. M.; CHESNESS, J. L. A simplified design procedure to determine the wetted radius for a trickle emitter. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 32, n. 6, p. 1909-1914, 1989.

RUSSO, D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for hydraulic properties. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 24, p. 453-459, 1988.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, JP, v. 37, n. 1, p. 9-17, 1981.

SALLES, R. F. M. Fisiologia de produção de olerícolas. In: WACHOWICZ, C. M.; CARVALHO, R. I. N. **Fisiologia vegetal: produção e pós-colheita**. Curitiba: Champagnat, 2002. p. 183-203.

SANTOS, C. R.; SILVA, J. A. M.; SANTOS, R. C.; MENDONÇA, C. E. S. Estudo de raízes de coqueiro anão verde em Neossolos Quartzarênicos da Fazenda São João, em Petrolina - PE. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. **Anais...** Juazeiro: ABID, 2003. 1 CD-ROM.

SCHAFFER, B. Flooding responses and water-use efficiency of subtropical and tropical fruit trees in an environmentally-sensitive wetland. **Annals of Botany**, London, GB, v. 81, p. 475-481, 1998.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 3, p. 242-253, 1985.

SEN, H. S.; PAUL, D.; BANDYOPADHYAY, K.; DASH, N. B. A simple numerical solution for two-dimensional moisture distribution under trickle irrigation. **Soil Science**, Baltimore, v. 154, n. 5, p. 350-356, 1992.

SEPASKHAH, A. R.; KASHEFIPOUR, S. M. Relationship between leaf water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, NL, v. 25, p. 13-22, 1994.

SILVA, C. A. S.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, R. D.; CINTRA, F. L. Avaliação da distribuição do sistema radicular da cultura da manga (*Mangifera indica* L.) por meio de imagens digitais. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 10, n. 2, p. 1-8, 1999.

SILVA, T. S. M.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. da S.; COELHO FILHO, M. A. Efeito da temperatura do ar e de diferentes lâminas de irrigação sob o índice de floração e pegamento de frutos do mamoeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. **Anais...** Juazeiro: ABID, 2003. 1 CD-ROM.

SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. C.; SOARES, J. M.; SILVA, J. A. M. Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 456-462, 2001.

SLAVIK, B. **Methods of studying plant water relations**. Berlim, DE: Springer Verlag, 1975. 449 p.

SIMUMEK, J.; SUAREZ, D. L. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 29, p. 487-497, 1993.

SMITH, M. **Report on the expert consultation of procedures for revision of FAO Guidelines for prediction of crops water requirements**. Rome, IT: FAO, 1991. 45 p.

SINCLAIR T. R.; LUDLOW M. M. Who taught plants thermodynamics? The unfulfilled potential of plant water potential. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 12, p. 213-217, 1985.

SOUSA, V. F. **Níveis de irrriação e doses de potássio aplicados via fertirrigação por gotejamento no maracujazeiro amarelo (Passiflora edulis Sims. f. flavicarpa Deg.)**. 2000. 187 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba .

SOUSA, V. F.; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A. Distribuição radicular do maracujazeiro sob diferentes doses de potássio aplicadas por fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n.1, p. 51- 56, 2002.

STEINBERG, S.; BAVEL, C. H. M. van; CORNELIUS, H. M. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of wood plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 114, n. 3, p. 466-472, 1989.

SUTCLIFFE, J. **As plantas e a água**. São Paulo: EPU, 1980. 124 p.

SYVERTSEN, J. P.; LLOYD, J. J. Citrus. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. C. (Ed). **Handbook of environmental physiology of fruit crops volume II: sub-tropical and tropical crops**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 65-101.

TAGHAVI, S. A.; MARIÑO, M. A.; ROLSTON, D. E. Infiltration from trickle irrigation source. **Journal of Irrigation and Drainage Engineer**, New York, v. 110, n. 4, p. 331-341, 1984.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 1998. 792 p.

TREJO-CHANDIA, J. E.; ANGELOCCI, L. R.; OLIVEIRA, R. F. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, n. 3, p. 221-231, 1997.

VALANCOGNE, C.; DAYAU, S.; AMEGLIO, T.; ARCHER, P.; DAUDET, F. A.; GAMA, M. I. F.; COHEN, M. Relations between relative transpiration and predawn leaf water potential in different fruit tree species. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 2, n. 449, p. 423-429, 1996.

VALANCOGNE, C.; NASR, Z. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. **Hortscience**, Alexandria, v. 24, n. 2, p. 383-385, 1989.

WARRICK, A. W. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 38, p. 383-386, 1974.

WARRICK, A. W.; AMOOZEGAR-FARD, A.; LOMEN, D. O. Linearized moisture flow from line sources with water extraction. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 22, p. 549-553, 1979.

WARRICK, A. W.; LOMEN, D. O.; AMOOZEGAR-FARD, A. Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 9 11-914, 1980.

WHILEY, A. W.; SCHAFFER, B. Avocado. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. C. (Ed.). **Handbook of environmental physiology of fruit crops volume II: sub-tropical and tropical crops**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 3-35.

WOODING, R. A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water resources Research**, Washington, DC, v. 4, p. 1259-1273, 1968.

WRIGHT, J. L. Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. (Ed.). **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 191-199.