

Capítulo 5

Manejo da água de irrigação

Waldir Aparecido Marouelli

Áureo Silva de Oliveira

Eugênio Ferreira Coelho

Luis Carlos Nogueira

Valdemício Ferreira de Sousa

Introdução

A preocupação com o uso eficiente da água na agricultura irrigada cresce proporcionalmente com o aumento da escassez de água de boa qualidade, agravando a competição entre os diversos setores que dela dependem.

Embora a agricultura irrigada seja, geralmente, associada a um elevado nível tecnológico, é consenso que a irrigação no Brasil é ainda praticada de forma inadequada, com grande desperdício de água (MANTOVANI et al., 2006; MAROUELLI et al., 2008c). Estima-se que, de toda a água captada para fins de irrigação, não mais que 50% sejam efetivamente utilizados pelas plantas (CHRISTOFIDIS, 2004). Especificamente em sistemas de irrigação por superfície, as perdas chegam a percentuais bem maiores. Segundo Mantovani et al. (2006), tal problema ocorre em razão de três fatores principais: a) diminuta utilização de critérios técnicos de manejo de água na maioria das áreas irrigadas; b) informações escassas e incompletas de parâmetros para manejo de água; c) uso de sistemas de irrigação com baixa eficiência de aplicação de água.

A aplicação de critérios técnicos adequados deve ocorrer tanto na fase de dimensionamento quanto durante a operação dos sistemas de irrigação. A escassez de informações completas sobre parâmetros de manejo de irrigação são sérios indicadores da existência de lacunas de resultados de pesquisa e da falta de sistematização das informações existentes. Já o uso de sistemas inadequados ao bom controle da irrigação é fruto de desinformação e/ou descapitalização para aquisição e implantação de sistemas mais modernos e eficientes. A experiência prática permite ressaltar também que o baixo nível de treinamento e capacitação dos técnicos e irrigantes, responsáveis diretos pela operação e manutenção dos sistemas de irrigação, tem uma imensa influência nas baixas eficiências de aplicação de água, principalmente nos países e regiões com menor nível tecnológico.

O desperdício de água na irrigação, além de aumentar os custos de produção, acarreta custos ambientais pelo comprometimento da disponibilidade e da qualidade da água. Essa situação tem levado muitos projetos de irrigação, em todo o mundo, a uma condição de baixa sustentabilidade econômica e socioambiental (CULLEN, 2004; OLIVEIRA et al., 2006; OSTER; WICHELNS, 2003). Segundo Oster e Wichelns (2003), a sustentabilidade de projetos de irrigação somente pode ser atingida por meio de ações efetivas tanto pelo agricultor quanto por órgãos públicos, visando a minimizar o desperdício de água durante sua captação, condução e aplicação à cultura, a degradação das águas superficiais e subterrâneas e, no caso das regiões áridas e semiáridas, os problemas de salinização.

Mesmo quando as irrigações são realizadas em excesso, prática comum em região com disponibilidade de água, as plantas são, muitas vezes, submetidas a condições de deficit hídrico, comprometendo o desempenho da cultura. Isso ocorre porque o agricultor tende a aplicar quantidades de água maiores do que o solo pode armazenar e espaça em demasia o intervalo entre irrigações (MAROUELLI et al., 2008c). Além de suprir as suas necessidades hídricas, a água proporciona a solubilização e a disponibilização dos nutrientes do solo para as plantas. Ademais, cultivos submetidos a condições de excesso ou falta de água são, respectivamente, mais predispostos a doenças e ao ataque de pragas (LOPES et al., 2006). Por conseguinte, é possível aumentar a produtividade da maioria das culturas entre 10% e 30% e, ao mesmo tempo, reduzir o uso de água em até 30% somente por meio da adoção de estratégias apropriadas de manejo de irrigação (MAROUELLI et al., 2008c).

Segundo Rosegrant et al. (2002), ações para melhorar a eficiência do uso de água na agricultura irrigada devem ser focadas nos níveis técnico, gerencial e institucional. Melhorias técnicas incluem a adoção de sistemas de irrigação mais avançados, como a aspersão e, principalmente, o gotejamento e a microaspersão, o uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas, além do conceito de agricultura de precisão, incluindo estratégias para o monitoramento da demanda de água pelas plantas. Melhorias gerenciais, em nível da propriedade, incluem a adoção de estratégias de manejo de água com base na demanda da cultura e melhoria da manutenção de equipamentos. Em termos institucionais, a melhoria envolve a criação de comitês para o estabelecimento de regras sobre direitos e uso eficiente da água e a introdução de tarifas para a cobrança da quantidade de água utilizada.

Aumentar a eficiência de aplicação de água na agricultura irrigada por meio da reconversão de sistemas de irrigação de baixa eficiência é, muitas vezes, a primeira opção a ser considerada. Todavia, a adoção de tal estratégia não garante redução do uso de água em níveis sustentáveis. Segundo Kongyan (2005) e Rosegrant et al. (2002), para aumentar a eficiência do uso de água, os agricultores, além de sistemas de irrigação mais eficientes, necessitam investir em novas tecnologias poupadoras de água, como aquelas relacionadas ao manejo racional de água, à redução das perdas de água por evaporação e à irrigação com deficit hídrico controlado. A adoção de tais tecnologias geralmente permite, segundo Kongyan (2005) e Lima et al. (1999), reduzir o gasto de água entre 10% e 50%, inclusive com incremento de produtividade.

Em quase todo o Brasil, é reduzida a frequência e fortes são as resistências ao uso de qualquer método de manejo racional da água de irrigação. O baixo índice de

adoção dessas tecnologias deve-se, segundo Marouelli et al. (2008c), ao fato de os produtores acreditarem que são caras, complexas, trabalhosas e não proporcionam ganhos econômicos compensadores, ou seja, está relacionado a questões de ordem econômica e social.

O acesso do irrigante à tecnologia é ainda restrito, tanto pela falta de informação quanto pelo custo dos equipamentos e instrumentos destinados ao manejo. Em muitas regiões onde se pratica agricultura irrigada, o baixo nível de instrução dos irrigantes dificulta a implantação de estratégias mínimas de manejo. Acrescenta-se o fato de que a água é barata ou sem custo e ainda tida como um recurso natural inesgotável. Nesse contexto, a prática da irrigação é desvinculada de técnicas de manejo reconhecidamente capazes de proporcionar aumentos de produtividade e racionalização do uso da água.

Na agricultura irrigada, assim como em qualquer outro empreendimento, os benefícios da adoção de uma tecnologia devem superar os custos. A adoção de estratégias apropriadas para o manejo da água de irrigação é comumente viável do ponto de vista econômico e ambiental, já que possibilita incrementos de produtividade, melhoria da qualidade de frutas e hortaliças, redução do uso de água, energia e agroquímicos, e contribui para a mitigação do problema da redução gradual de fontes de água de boa qualidade (MAROUELLI et al., 2000; WESTHUIZEN et al., 1996).

O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir os principais indicadores e métodos de manejo de irrigação, assim como os parâmetros necessários ao manejo adequado de água nas principais hortaliças e fruteiras cultivadas no Brasil.

Considerações gerais sobre manejo da água de irrigação

As questões sobre o momento de irrigar e a quantidade de água a aplicar são básicas no manejo da água de irrigação. O manejo deve ser feito visando a fornecer água às plantas em quantidade suficiente para prevenir o estresse hídrico, favorecendo incremento de produtividade e qualidade da produção, e minimizar o desperdício de água, a lixiviação de nutrientes e a degradação do meio ambiente. Isso envolve a decisão de irrigar em quantidades que possam ser armazenadas no solo, na camada correspondente à zona radicular, e em intervalos suficientes para atender à demanda de água das plantas.

Em condições de campo, as plantas encontram-se, durante todo o ciclo de desenvolvimento, sujeitas a estresses ambientais resultantes das variações temporais dos elementos do sistema solo-atmosfera, que influenciam as taxas de crescimento e desenvolvimento. O teor de água no solo é um dos mais significativos elementos desse complexo. Não havendo reposição de água pela chuva ou irrigação, a redução do teor de água no solo para níveis críticos, por longo tempo, acarretará alterações e desordens de natureza fisiológica com reflexos na anatomia, fenologia e crescimento das plantas e, por extensão, na produtividade e na qualidade do produto colhido.

O solo é um reservatório não somente de água, mas também de nutrientes e oxigênio, sendo ainda o ambiente onde proliferam microrganismos que interagem com as plantas e com o próprio meio. Variações da umidade do solo devem ser reguladas e mantidas em limites que favoreçam a absorção de água e nutrientes pelas plantas, bem como a aeração e a atividade microbiana, indispensável à decomposição da matéria orgânica e à estruturação do solo.

A necessidade hídrica de uma cultura, havendo disponibilidade de água no solo, é dependente das condições atmosféricas locais. Numa área vegetada, a mudança de estado físico da água e a conseguinte remoção do vapor das superfícies evaporantes (solo e planta) para a atmosfera denominam-se evapotranspiração, sendo função da radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar. A quantidade de água a ser aplicada por irrigação deve otimizar a evapotranspiração da cultura em condições de irrigação total ou suplementar. Além disso, o manejo de água pode ser requerido para atender a outras finalidades secundárias, como a lixiviação do excesso de sais para além do sistema radicular das culturas, a aplicação de fertilizantes e agroquímicos, a proteção das plantas contra geadas, o resfriamento do solo e das plantas e a germinação de sementes (MARTIN; GILLEY, 1993).

Do refinamento do processo de manejo da água de irrigação, benefícios tipicamente esperados incluem (BRONER, 1993; MAROUELLI et al., 2008c):

- Redução das condições de estresse hídrico (excesso e/ou falta de água) à cultura.
- Redução das perdas de fertilizantes na medida em que minimiza as perdas de água por escoamento superficial e lixiviação.
- Redução de problemas de doenças de solo e da parte aérea, principalmente aquelas associadas a irrigações em excesso e/ou frequentes.

- Manutenção da salinidade na zona radicular das plantas em limites aceitáveis por meio de lixiviação planejada e controlada de sais.
- Redução de problemas de encharcamento do solo, reduzindo problemas de aeração e necessidade de drenagem.
- Aumento de produtividade das culturas e da qualidade dos produtos.
- Redução de despesas com água, energia, mão de obra, agroquímicos e manutenção do sistema de irrigação.
- Redução das perdas de água por percolação profunda, escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão dos solos.
- Melhoria da qualidade das águas subterrâneas e/ou superficiais a jusante.
- Potencialização do retorno do investimento pelo aumento da receita bruta e redução de custos.
- Ampliação da área irrigada, especialmente na época seca, em razão da economia de água.

Para fruteiras e hortaliças, as estratégias de manejo de água com o objetivo de maximizar o rendimento econômico são, em geral, bem semelhantes às estratégias visando ao máximo rendimento físico (produtividade/qualidade). Isso porque os custos variáveis associados à irrigação (água, energia e mão de obra) são pequenos (<5%) comparados ao custo operacional total para a produção da maioria das fruteiras e hortaliças (MAROUELLI et al., 1990, 2008a). Assim, as estratégias apresentadas a seguir visam a maximizar a produtividade/qualidade das culturas por unidade de área, reduzindo-se ao máximo a quantidade de água aplicada às culturas. Em várias situações, a maximização da produtividade/qualidade somente é alcançada manejando-se a irrigação com um determinado nível de deficit hídrico, durante um ou mais estádios de desenvolvimento da cultura.

Indicadores para manejo da água de irrigação

De maneira geral, as irrigações devem ser realizadas quando a deficiência de água na planta causar decréscimo acentuado em suas atividades fisiológicas e, conseqüentemente, afetar o seu desenvolvimento e a sua produtividade. Na prática, a decisão de quando irrigar é simplificada de acordo com cada caso particular ou

estratégia de manejo adotada, sendo, muitas vezes, tomada com base na avaliação da deficiência de água no solo ou conjuntamente por meio de indicadores com base na planta, no solo e/ou na atmosfera.

A quantidade de água que deve ser aplicada por irrigação é comumente a necessária para que o solo retorne a sua condição de capacidade de campo na camada de solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. Essa quantidade pode ser determinada, fundamentalmente, com base na avaliação da disponibilidade atual de água no solo ou na quantidade de água evapotranspirada pela cultura entre duas irrigações consecutivas. Havendo risco de salinidade, que pode ocorrer em regiões áridas e semiáridas ou em ambiente protegido, deve-se aplicar uma fração de água adicional para manter o balanço de sais no solo em nível adequado.

Vários são os indicadores disponíveis para a determinação do momento de irrigar e da quantidade de água a ser aplicada, podendo ser agrupados como segue:

- Indicadores de manejo com base na planta.
- Indicadores de manejo com base no solo.
- Indicadores de manejo com base na atmosfera (evapotranspiração).

Os indicadores com base na planta possibilitam apenas estabelecer o momento de irrigar, enquanto aqueles com base na atmosfera permitem somente estimar a quantidade de água a ser aplicada por irrigação. Já os indicadores com base no solo geralmente possibilitam determinar quando e quanto irrigar. Na prática, é comum utilizar conjuntamente mais de um indicador do sistema solo-planta-atmosfera para fins de manejo da água de irrigação.

A seguir, são apresentados os principais indicadores com base na planta, no solo e na atmosfera, que conjugam, em parte ou no todo, praticidade de operação, e custo competitivo de aquisição e de implantação, além da vantagem de poderem ser aplicados a um amplo elenco de culturas.

Indicadores de manejo de irrigação com base na planta

O organismo vegetal (planta) integra os efeitos das condições ambientais e faz a interface entre o solo (reservatório de água) e a atmosfera ("sumidouro").

Um procedimento lógico, portanto, para programar as irrigações seria avaliar o estado hídrico da planta.

Para avaliação da deficiência de água nas plantas, Haise e Hagan (1967) consideraram a folha como o principal órgão da planta a ser avaliado, destacando-se os seguintes indicadores: mudança da coloração, ângulo de posição das folhas, índice de crescimento, teor absoluto de água, potencial hídrico, temperatura, taxa de transpiração e abertura estomatal. Jones (2004) relatou que, de modo geral, os processos de avaliação desses indicadores, com exceção da aparência visual, são muito mais caros, trabalhosos e complexos para uso comercial quando comparados àqueles com base no solo.

Um dos procedimentos com base na planta, com melhor precisão, é o índice de estresse hídrico da cultura, do termo técnico em inglês *Crop Water Stress Index* (CWSI), que leva em consideração a diferença entre as temperaturas da folha e do ar e o déficit de pressão de vapor do ar.

Até o presente momento, a alternativa de programação da irrigação a partir de indicadores com base na planta não tem tido muita aceitação. Além de não permitirem, isoladamente, determinar a quantidade de água necessária a cada irrigação, os métodos de manejo que utilizam tais indicadores requerem calibrações sofisticadas, são bastante sensíveis a variações ambientais, pouco sensíveis a variações do teor de água no solo e ainda demandam maior desenvolvimento tecnológico. Portanto, são ainda pouco confiáveis para indicação rotineira sobre o momento de irrigar (JONES, 2004; WRIGHT; STARK, 1990).

Aparência visual da planta

Em algumas áreas irrigadas, os produtores têm definido o momento de irrigar apenas com base na aparência visual da planta, principalmente coloração e ângulo de posição das folhas. Todavia, em muitos casos, quando for possível observar os sintomas de deficiência de água na planta, seja pela mudança de coloração, seja pelo ângulo de curvatura da folha, as atividades fisiológicas da planta e a produtividade já terão sido comprometidas (JONES, 2004). Marouelli e Guimarães (2006) relataram, por exemplo, que pode ocorrer queda de produtividade acima de 20% se a decisão de irrigar a cultura da batata for tomada somente quando aparecerem os sintomas visuais de murchamento e de folhas com coloração verde mais escuro.

Ao contrário de outras espécies, plantas de cebola e alho geralmente não murcham quando submetidas a condições de deficiência hídrica. Assim, sintomas imediatos de deficiência hídrica moderada para essas espécies são difíceis de ser visualizados em condições de campo (BOSCH SERRA; CURRAH, 2002).

Como a resposta das plantas ao deficit hídrico depende da espécie e da variedade cultivada, experiência e cuidados são importantes na aplicação desse indicador. Algumas culturas, mesmo quando bem hidratadas ou em solos com umidade próxima à capacidade de campo, podem apresentar sinais visuais de estresse em torno do meio-dia e início da tarde, em dias quentes e secos.

A aparência visual, como estratégia de manejo, pode ser melhorada quando da observação conjunta das condições hídricas da planta e do solo. A avaliação da umidade do solo deve ser feita na posição e profundidade corretas em relação à planta e ao seu sistema radicular efetivo.

Potencial de água na folha

Para uso do potencial de água na folha, é necessário dispor de um equipamento para avaliação do estado hídrico da planta, conhecido como câmara de pressão tipo Scholander (SCHOLANDER et al., 1965). É um equipamento de custo relativamente alto e que exige pessoal qualificado para sua utilização. A metodologia de determinação do potencial consiste em colocar uma parte da planta, geralmente a folha, no interior da câmara e medir a pressão requerida para forçar a saída da seiva existente nos tecidos da folha através do pecíolo. O potencial hídrico da folha (ψ_f) deve ser lido assim que a seiva surgir no pecíolo. O potencial deve então ser comparado a um valor de potencial crítico (ψ_{fc}) para a cultura de interesse. Deve-se irrigar sempre que o valor absoluto de ψ_f for maior ou igual a ψ_{fc} . Na Tabela 1, são apresentados valores médios de ψ_{fc} que acarretam reduções significativas da taxa de transpiração e da produtividade de algumas fruteiras e hortaliças.

Tem sido comumente apresentado na literatura técnica que o potencial de água na folha é, teoricamente, o indicador mais apropriado para avaliar vários processos fisiológicos, inclusive para indicar quando irrigar. Entretanto, Jones (2004) relatou que o potencial de água na folha é pouco preciso em razão de estar sujeito a rápidas flutuações temporais, em virtude de variações ambientais, como uma simples passagem de nuvens, e da regulação homeostática entre diferentes regimes hídricos no solo.

Tabela 1. Potencial crítico de água na folha (ψ_{fc}), o qual acarreta reduções da evapotranspiração e produtividade para algumas fruteiras e hortaliças.

Cultura	ψ_{fc} (MPa)	Fonte
Abacate	-0,90 a -1,20	Chartzoulakis et al. (2002)
Banana	-0,35 a -1,00	Turner (1994)
Batata	-0,40 a -0,80	Phene et al. (1992) e Wright e Stark (1990)
Citros	-1,20 a -2,30	Syvertsen e Lloyd (1994)
Manga	-1,20 a -1,80	Coelho et al. (2000)
Maracujá	-2,50	Menzel e Simpson (1994)
Pimentão	-0,60 a -0,75	Thompson et al. (2007)
Tomate	-0,40 a -0,60	Thompson et al. (2007)
Uva	-1,00 a -1,60	Williams e Matthews (1990)

Visando a minimizar os problemas levantados por Jones (2004), recomenda-se que as determinações de ψ_f sejam feitas pouco antes do amanhecer, pois a hidratação dos tecidos da planta ainda estará sendo controlada pelo teor de água no solo. Durante o período diurno, a hidratação dos tecidos é controlada pelas condições meteorológicas. O deficit hídrico na planta pode ser várias vezes maior durante o período de calor do dia do que antes do amanhecer. Além disso, as leituras não serão consistentes de um dia para outro por razão de variações de nebulosidade, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e inclinação do sol.

Outro problema do indicador potencial de água na folha é que o equipamento usado para realizar as medições é inadequado a plantas com pecíolos muito frágeis, que se rompem facilmente antes que qualquer leitura seja feita, como é o caso das cucurbitáceas (melancia, melão, abóbora, pepino, etc.).

Temperatura da folha e índice de estresse hídrico da cultura

A estimativa do estado hídrico da planta com base na temperatura pode ser feita por meio de medidas de temperatura do ar e da folhagem, usando-se um termômetro portátil de infravermelho. A técnica tem como base o fato de que as folhas de uma planta que se encontra em estado túrgido refletem mais luz infravermelha do que as de uma planta com folhas murchas (HAISE; HAGAN, 1967) e a temperatura da planta aumenta em relação ao ambiente em resposta ao fato de o sistema radicular não ser capaz de suprir a demanda de transpiração.

Quando a disponibilidade de água no solo não é limitante, a temperatura da folhagem (T_f) responde à radiação líquida, ao deficit de pressão de vapor e à velocidade do vento. Em geral e para um amplo espectro de culturas, a T_f varia de 12 °C abaixo da temperatura do ar (T_a) a 6 °C acima (HATFIELD; SNYDER, 1989).

Como regra, para condições sem restrições de água no solo, o valor de T_f se aproxima do valor de T_a , enquanto, para condições de deficiência hídrica, T_f torna-se muito maior do que T_a em decorrência de uma redução significativa da taxa de transpiração. Todavia, as simples medições de T_f e T_a não permitem determinar, com um mínimo de precisão, o momento de irrigar, pois o processo de determinação do estado hídrico da planta envolve outras variáveis.

A variação entre T_f e T_a , quando associada ao deficit de pressão de vapor do ar, pode ser utilizada para determinar quando irrigar por meio do índice de estresse hídrico da cultura (*IEHC*), como definido empiricamente por Idso et al. (1981) e teoricamente por Jackson et al. (1981). Em condições de suprimento adequado de água, a diferença $T_f - T_a$ depende do deficit de saturação de vapor de água do ar (*DPV*). Havendo deficiência de água no solo, $T_f - T_a$ independe de *DPV*, como mostrado na Figura 1 para o caso do milho-doce (SILVA, 2004). Com base nas linhas-base ajustadas para as condições com e sem deficit hídrico, o *IEHC* para um valor específico de *DPV* é calculado utilizando-se a equação 1, descrita a seguir:

$$IEHC = \frac{(T_f - T_a)_B - (T_f - T_a)_C}{(T_f - T_a)_A - (T_f - T_a)_C} \quad (1)$$

em que T_f é a temperatura da folhagem da planta (°C), T_a a temperatura do ambiente (°C), $(T_f - T_a)_B$ a diferença entre T_f e T_a para uma condição atual e valor específico de *DPV*, $(T_f - T_a)_C$ a diferença entre T_f e T_a para uma condição sem deficit hídrico e valor específico de *DPV* e $(T_f - T_a)_A$ a diferença entre T_f e T_a para uma condição com deficit hídrico e valor específico de *DPV*.

O valor de *IEHC* varia entre 0 e 1. Valores iguais ou próximos a 0 indicam plantas adequadamente hidratadas e valores próximos a 1 indicam plantas em condições de deficit hídrico severo. A decisão sobre o momento de irrigar é feita comparando-se o valor atual de *IEHC* ($IEHC_a$) com o valor crítico para a cultura ($IEHC_c$). Assim, se $IEHC_a$ for menor que $IEHC_c$, não se faz necessário irrigar; caso contrário, a irrigação deve ser realizada sob pena de comprometer a produtividade da cultura.

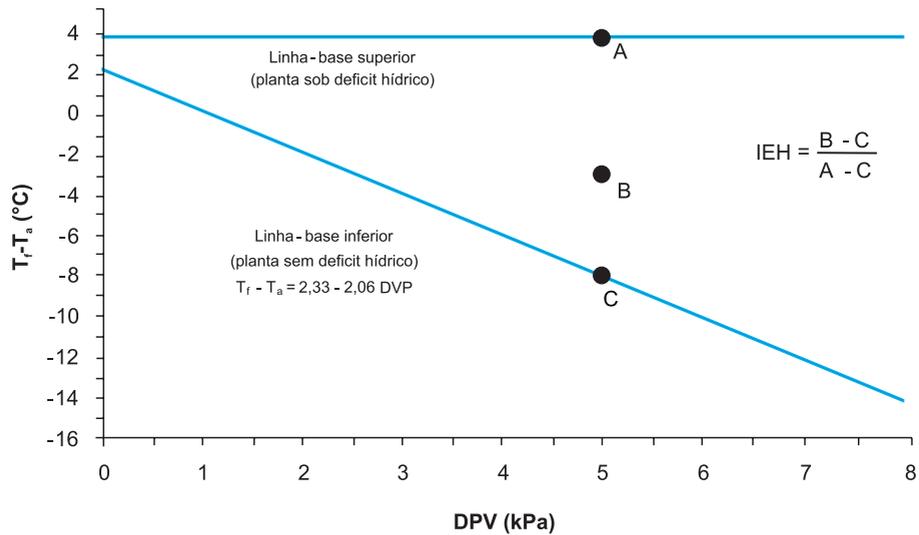


Figura 1. Linhas-base para milho-doce com e sem deficit hídrico conforme a diferença entre a temperatura da folhagem (T_f) e do ar (T_a) e em razão do deficit de pressão de vapor de água do ar (DPV), para determinação do índice de estresse hídrico da cultura ($IEHC$). Para o exemplo dos pontos A, B e C, o $IEHC$ será de 0,42.

Fonte: adaptado de Silva (2004).

Embora o $IEHC$ tenha-se mostrado vantajoso nas condições áridas do Arizona, onde foi desenvolvido, Jones (2004) relatou que, em regiões de clima mais úmido e nublado, a metodologia tem-se mostrado menos precisa. Apesar de algumas deficiências, o uso de termômetros de infravermelho, como uma ferramenta para manejo da água de irrigação, tem aumentado principalmente em regiões áridas. Existe no mercado aparelho capaz de fornecer em tempo real, além da temperatura da folhagem e do ar e da umidade relativa do ar, o valor do $IEHC$ no instante da medição e compará-lo com um valor crítico para definição do momento de irrigar.

Indicadores de manejo de irrigação com base no solo

Informações sobre o teor de água do solo existente na zona radicular das plantas, bem como sobre a energia com que a água está retida no solo, têm sido uma das estratégias mais utilizadas para definição do momento de irrigar. Ao contrário de dados com base na planta, os indicadores com base no solo possibilitam determinar, além do momento da irrigação, a quantidade de água a ser aplicada por irrigação. Esses indicadores podem ser expressos por meio do teor de água no

solo, tensão de água no solo e/ou uma junção dos dois, utilizando-se a curva de retenção de água no solo.

Segundo Jones (2004), os principais problemas desses indicadores são: a) variabilidade espacial do solo, o que exige a amostragem ou instalação de sensores em vários locais da área; b) dificuldade de selecionar a distância da planta e a profundidade de instalação que efetivamente represente a zona radicular; c) a maioria dos sensores não mede teor de água diretamente, necessitando de calibração.

Teor de água no solo

O nível de umedecimento do solo é representado pelo volume (ou massa) de água contido em um volume (ou massa) de solo, conhecido como conteúdo ou teor de água no solo. Constitui informação fundamental para a determinação da quantidade de água necessária a restabelecer o nível adequado de umidade do solo na zona radicular da cultura, sem que ocorram perdas significativas de água por percolação profunda. Além de permitir calcular a quantidade de água por evento de irrigação, a informação sobre o teor de água no solo também pode ser utilizada para indicar o momento de irrigar (SHOCK et al., 2007).

A determinação da umidade do solo pode ser feita por vários métodos e equipamentos. Pode ser estimada por métodos bem práticos e simples, como o do tato-aparência, ou medida por meio de modernos instrumentos e sensores eletrônicos. Uma ampla discussão sobre esses métodos encontra-se disponível na literatura (CAMPBELL; MULLA, 1990; EVETT, 2007; PHENE et al., 1992).

Entre os indicadores de mais baixo custo para fins de manejo de água em áreas de produção, estão os métodos do tato-aparência, gravimétrico direto (padrão de estufa) e das pesagens (BERNARDO et al., 2005; MAROUELLI; GUIMARÃES, 2006). O método gravimétrico direto é referência para comparação e calibração de todos os outros métodos indiretos de determinação da umidade do solo. Sua desvantagem para fins de manejo de água é fornecer o resultado da umidade do solo somente 24 horas após a sua amostragem.

Uma grande variedade de sensores dielétricos, usando tecnologias de reflectometria no domínio do tempo (*TDR*) e de capacitância – também referenciados como reflectometria no domínio da frequência (*FDR*) –, está disponível para estimativa do teor de água no solo. Os sensores do tipo *TDR* são os mais precisos, porém de maior custo, o que tem inviabilizado seu uso para manejo em áreas de produção comercial. A umidade do solo é estimada a partir da medição direta da constante dielétrica do solo, que varia com a quantidade de água no solo. No

caso dos sensores do tipo capacitivo ou *FDR*, a precisão e o custo de aquisição são inferiores ao *TDR*, mas mesmo assim fora do alcance dos agricultores, especialmente no Brasil. Os sensores capacitivos usam diferentes tipos de osciladores eletrônicos, que produzem uma frequência de onda ressonante capaz de detectar variações nas propriedades dielétricas e, por conseguinte, no conteúdo de água no solo (ANDRADE et al., 2008; EVETT, 2007).

Outra técnica que pode ser utilizada para a determinação do teor de água no solo é a da moderação de nêutrons. Trata-se de uma técnica com boa precisão, mas tem alto custo. E por se tratar de um equipamento radioativo, com risco para o ambiente e para a saúde do operador, é indicado apenas para fins de pesquisa.

A escolha do método mais adequado para a determinação do teor de água no solo deve levar em conta critérios como cultura a ser irrigada, praticidade de uso, operacionalidade, exigência em pessoal qualificado, princípio de funcionamento, tamanho da área irrigada, diversidade de culturas a serem irrigadas, custo de aquisição e manutenção, e precisão e confiabilidade das leituras. Vários estudos relatam o uso, a precisão e a versatilidade dos diferentes indicadores de teor de água no solo, quando do manejo e da programação da irrigação (DOMINGO et al., 1996; FARES; ALVA, 2000; SINGANDHUPE et al., 2003; YANG et al., 2003).

Para fins de pesquisa e para grandes áreas de produção de espécies de alto valor econômico, o sistema *TDR* deveria ser o preferido. No caso dos sensores do tipo capacitivo e *FDR*, deve-se ter maior cuidado na calibração dos equipamentos e na escolha daqueles modelos que possibilitem maior precisão. Todavia, todos os métodos indiretos de determinação da umidade do solo, incluindo aqueles tecnologicamente mais sofisticados e de mais alto custo, requerem algum tipo de calibração.

Em muitas áreas irrigadas, a aplicação de água não segue um indicador apropriado e é efetuada apenas repetindo-se as aplicações feitas anteriormente, consistindo no que os irrigantes têm informado como sendo “irrigação com base na experiência”. Esse método tem baixo nível relativo de precisão. Em alguns poucos casos, a avaliação da disponibilidade de água no solo tem sido realizada pelos agricultores pela aparência visual do solo. A precisão desse procedimento também é baixa, principalmente para agricultores sem a devida destreza e se a amostragem for feita em local não representativo. A avaliação visual da umidade apenas na camada superficial do solo não fornece informação confiável sobre a real disponibilidade de água na zona radicular da cultura. Uma precisão minimamente aceitável pode ser alcançada quando a amostragem de solo é realizada com auxílio de um trado entre 30% e 50% da profundidade das raízes, próximo à planta, e em pelo menos três pontos representativos da área (MAROUELLI; GUIMARÃES, 2006), utilizando-se as informações da Tabela 2. O uso

do guia prático apresentado nessa tabela permite ao produtor estimar a fração de água disponível no solo por meio de observações da consistência (tato) e da aparência do solo (método do tato-aparência).

Tabela 2. Guia prático para estimativa da água disponível no solo (AD) conforme a textura, a consistência e a aparência do solo.

AD (%)	Textura do solo			
	Grossa	Moderadamente grossa	Média	Fina
0–25	Seco, solto, escapa entre os dedos	Seco, solto, escapa entre os dedos	Seco, por vezes formando torrão que raramente se conserva	Duro, esturricado, às vezes com grânulos soltos na superfície
25–50	Seco, não forma torrão	Sinais de umidade, mas não forma torrão	Forma torrão, algo plástico, mas com grânulos	Maleável, formando torrão
50–75	Seco, não forma torrão	Tende a formar torrão que raramente se conserva	Forma torrão, algo plástico, que às vezes desliza entre os dedos ao ser comprimido	Forma torrão que desliza entre os dedos na forma de lâmina ao ser comprimido
75–100	Tende a se manter coeso; às vezes, forma torrão que se rompe facilmente	Forma torrão que se rompe facilmente e não desliza entre os dedos	Forma torrão muito maleável que desliza facilmente entre os dedos	Ao ser comprimido, desliza entre os dedos na forma de lâmina escorregadiça
100 (CC) ⁽¹⁾	Ao ser comprimido, não perde água, mas umedece a mão	Ao ser comprimido, não perde água, mas umedece a mão	Ao ser comprimido, não perde água, mas umedece a mão	Ao ser comprimido, não perde água, mas umedece a mão

⁽¹⁾ CC = capacidade de campo.

Obs.: o torrão se forma comprimindo-se, na palma da mão, um punhado de solo. O solo desliza entre os dedos polegar e indicador ao ser comprimido, ao tentar fechar os dedos. A amostra de solo a ser avaliada deve ser retirada entre ¼ e ½ da camada de solo representativa da profundidade efetiva das raízes da cultura.

Fonte: adaptado de Irrigation... (1959).

Tensão de água no solo

A tensão de água na matriz do solo (valor positivo do potencial matricial) é um importante indicador de disponibilidade de água para as plantas, pois caracteriza o estado da energia da água que interage com a matriz do solo, representando uma medida da quantidade de energia requerida pelas plantas para extrair água do solo (SMAJSTRLA; PITTS, 1997). Quanto mais fortemente a água estiver retida no solo, maior será a quantidade de energia que a planta terá que despende para absorver a água necessária a atender às suas necessidades metabólicas, com destaque para a transpiração. Desse modo, medidas de tensão podem ser utilizadas para avaliar indiretamente a deficiência hídrica das plantas, pois a taxa de transpi-

ração é controlada, dentro de certos limites, pelo próprio solo (HEERMANN et al., 1990; SILVA et al., 1999). Assim, segundo Allen et al. (1998) e Evett (2007), a taxa de extração de água do solo pelas raízes da planta é influenciada mais diretamente pela tensão de água no solo e sua condutividade hidráulica associada do que pelo teor de água.

Medidas de tensão tomadas no perfil do solo permitem ainda estimar a quantidade de água a ser aplicada por irrigação, seja de forma empírica (por tentativa, com auxílio dos sensores), seja a partir da curva de retenção de água no solo (curva característica). Nem toda a água presente no solo está disponível para as plantas de maneira similar. À medida que o solo vai secando, mais difícil se torna à planta extrair água por meio de suas raízes. Por outro lado, excesso de água no solo não é garantia de bom desenvolvimento das plantas. Embora, nesse caso, a água esteja livremente disponível (tensão próxima a 0), pode saturar grande parte dos espaços porosos do solo, comprometendo a aeração e afetando negativamente o bom funcionamento das raízes. Como regra, as informações apresentadas na Tabela 3 podem ser usadas para interpretar a condição da disponibilidade de água no solo, conforme as principais faixas de tensão.

Valores de tensão crítica de água no solo para reinício das irrigações são apresentados na Tabela 4 para hortaliças irrigadas por aspersão, na Tabela 5 para hortaliças irrigadas por sulco e gotejamento e na Tabela 6 para fruteiras. Conforme indicado nas tabelas, verifica-se que a tensão crítica é também função do sistema de irrigação, do estágio de desenvolvimento da cultura, da textura do solo e da demanda evaporativa da atmosfera (SHOCK et al., 2007; THOMPSON et al., 2007).

Vários equipamentos têm surgido para a medição da tensão de água no solo e utilizados para fins de manejo de água por agricultores em diferentes países, com destaque para o tensiômetro e os blocos de resistência elétrica (EVETT, 2007; HEERMANN et al., 1990; SANDERS, 1997). No Brasil, vários produtores de hortaliças, flores e mudas de fruteiras e espécies florestais têm utilizado o sistema Irrigas® (CALBO; SILVA, 2006).

Tensiômetros

Embora seja o mais antigo método para medir a tensão de água no solo, datando do início do século 20, o tensiômetro é ainda, provavelmente, o sensor mais utilizado para medição do estado da água no solo (EVETT, 2007). Segundo Silva et al. (1999), suas principais vantagens comparativas em relação a outros indicadores

Tabela 3. Condição e interpretação da disponibilidade de água no solo conforme a faixa de tensão de água no solo.

Tensão (kPa)	Condição e interpretação
0 a 6	Solo próximo à saturação. Tensões nessa faixa por períodos contínuos indicam irrigações em excesso, perda de água por drenagem profunda, lixiviação de nutrientes e deficiência de aeração para as raízes
6 a 10	Solo com umidade próxima à capacidade de campo. Irrigações devem ser interrompidas nessa faixa a fim de prevenir os problemas associados à condição de solo próximo à saturação. A capacidade de campo em solos arenosos está associada a menores valores de tensão
10 a 20	Solo com excelente condição de umidade e boa aeração. Faixa de tensão indicada para a irrigação de culturas altamente sensíveis ao déficit de água, de solos de textura grossa e/ou via gotejamento
20 a 40	Solo com boa condição de umidade e excelente aeração. Faixa de tensão indicada para a irrigação de culturas sensíveis ao déficit de água
40 a 70	Solo com disponibilidade limitada de umidade e excelente aeração. Faixa de tensão indicada para a irrigação de culturas com tolerância moderada ao déficit de água
> 70	Solo com disponibilidade restrita de água e excelente aeração. Condição indicada apenas para culturas tolerantes ao déficit de água ou durante estádios específicos de desenvolvimento de algumas espécies. Tensão máxima operacional para tensiômetros em virtude da entrada de ar através da cápsula e formação acentuada de bolhas de vapor de água dentro do sistema

Fonte: adaptado de Marouelli (2008) e Stegman et al. (1983).

Tabela 4. Faixas de tensão crítica de água no solo em que se deve promover a irrigação para obtenção de produtividade máxima para algumas hortaliças irrigadas por aspersão.

Hortaliça	Tensão crítica ⁽¹⁾ (kPa)	Fonte
Abóbora	25–50	Stansell e Smittle (1989)
Alface	20–50	Sammis (1980)
Alho	15–30	Marouelli et al. (2002a, 2002b)
Batata	20–40	Marouelli et al. (1988)
Batata-doce	25–100	Smittle et al. (1990)
Berinjela	30–60	Sanders (1997)
Beterraba	40–60	Doorenbos e Pruitt (1977)
Brócolis	25–50	Maurer (1976) e Sanders (1997)
Cebola	15–45	Carrijo et al. (1990) e Sanders (1997)
Cenoura	20–30	Silva et al. (1982)
Couve-flor	25–40	Kaniszewski e Rumpel (1998) e Sanders (1997)
Ervilha-seca	100–200	Marouelli et al. (1991a)
Feijão-vagem	25–70	Singh (1989)
Lentilha	200–400	Saraf e Baitha (1985)

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Hortaliça	Tensão crítica ⁽¹⁾ (kPa)	Fonte
Melancia	25–50	Hegde (1987)
Melão	30–60	Sanders (1997)
Milho-doce	45–100	Sanders (1997) e Taylor (1965)
Morango	20–30	Haise e Hagan (1967)
Pepino	40–80	Sanders (1997)
Pimentão	20–50	Batal e Smittle (1981)
Repolho	25–60	Enciso et al. (2007) e Sanders (1997)
Tomate de mesa	30–100	Silva e Simão (1973)
Tomate industrial	30–400	Marouelli e Silva (2005)

⁽¹⁾ Valores à esquerda devem ser utilizados durante os períodos críticos de déficit hídrico, condições de alta demanda evaporativa da atmosfera ($E_{To} > 6 \text{ mm dia}^{-1}$) e/ou solos arenosos.

Tabela 5. Faixas de tensão crítica de água no solo em que se deve promover a irrigação para obtenção de produtividade máxima para algumas hortaliças irrigadas por sulco e gotejamento.

Tensão crítica (kPa) ⁽¹⁾	Hortaliça
Sistema por sulco	
20 a 40	Abóbora, alface, alho, batata, berinjela, brócolis, cebola, cenoura, feijão-vagem, folhosas em geral, melancia, melão, morango e pimentão
40 a 70	Batata-doce, beterraba, couve-flor, milho-doce, pepino, repolho e tomate
70 a 200	Ervilha, grão-de-bico e lentilha
Sistema por gotejamento	
10 a 20	Abóbora, alface, alho, batata, berinjela, brócolis, cebola, cenoura, feijão-vagem, folhosas em geral, melancia, melão, morango e pimentão
20 a 40	Batata-doce, beterraba, couve-flor, milho-doce, pepino, repolho e tomate

⁽¹⁾ Valores à esquerda devem ser utilizados durante os períodos críticos de déficit hídrico, condições de alta demanda evaporativa da atmosfera ($E_{To} > 6 \text{ mm dia}^{-1}$) e/ou solos arenosos.
Fonte: adaptado de Marouelli (2008).

Tabela 6. Faixas de tensão crítica de água no solo em que se deve promover a irrigação para obtenção de produtividade máxima para algumas fruteiras.

Fruteira	Tensão crítica ⁽¹⁾ (kPa)	Fonte
Abacate	35–55	Coelho et al. (2000)
Abacaxi	25–60	Oliveira et al. (2006)
Acerola	25–55	Oliveira et al. (2006)
Banana	25–45	Coelho et al. (2000)

Continua...

Tabela 6. Continuação.

Fruteira	Tensão crítica ⁽¹⁾ (kPa)	Fonte
Citros	30–45	Coelho et al. (2000)
Goiaba	10–45	Coelho et al. (2000)
Mamão	15–45	Oliveira et al. (2006)
Manga	15–60	Coelho et al. (2000)
Maracujá	10–20	Coelho et al. (2000)
Uva de mesa	15–25	Gurovich (1996)
Uva vinífera	15–50	Neja et al. (1977)

⁽¹⁾ Valores à esquerda devem ser utilizados durante os períodos críticos de déficit hídrico, condições de alta demanda evaporativa da atmosfera ($ETo > 6 \text{ mm dia}^{-1}$) e/ou solos arenosos.

com base no solo são: medição direta e em tempo real da tensão de água no solo, sendo a umidade determinada indiretamente; qualidade no manejo de água desde que convenientemente instalado, mantido e interpretado; custo relativamente baixo; e facilidade de ser encontrado no mercado.

Informações teóricas e práticas sobre tensiômetros e seu uso podem ser encontradas em Faria e Costa (1987), Libardi (1993) e Marouelli (2008). Os modelos de tensiômetros mais utilizados são os de vacuômetro metálico tipo Bourdon (Figura 2) e os de punção. As unidades de medida dos vacuômetros são geralmente expressas em kPa, cbar, mmHg e cmH_2O , em que: $1 \text{ kPa} = 1 \text{ cbar} = 7,5 \text{ mmHg} = 10,2 \text{ cmH}_2\text{O}$. Os tensiômetros com vacuômetro de mercúrio, apesar de apresentarem excelente precisão, são de mais difícil instalação e operação. Por usarem mercúrio metálico, são menos seguros do ponto de vista ambiental e não devem ser utilizados.

Os tensiômetros de punção não dispõem de vacuômetro acoplado. A leitura é realizada por meio de um vacuômetro portátil (digital ou analógico), conhecido como tensímetro (Figura 3). Em razão do custo relativamente alto do tensímetro digital, o tensiômetro de punção somente começa a ser economicamente viável quando o produtor necessita utilizar pelo menos dez unidades (MAROUELLI, 2008). O tensímetro analógico apresenta custo bem mais baixo do que o digital, porém a precisão é inferior.

O tensiômetro permite leitura de tensão até cerca de 80 kPa. Para tensões maiores, começa a haver formação acentuada de bolhas de vapor dentro da água sob vácuo, causando o processo de cavitação no sistema, o que faz o instrumento parar de funcionar. Mesmo cobrindo apenas de 40% a 70% da água disponível no solo, os tensiômetros são recomendados para o manejo de água da maioria das culturas. Para que apresentem desempenho satisfatório, é indispensável observar



Figura 2. Tensiômetros com vacuômetro metálico tipo Bourdon.

Figura 3. Tensiômetros de punção para leitura com tensímetro analógico ou digital.



uma série de cuidados e procedimentos no preparo, instalação, operação, manutenção e armazenamento, conforme apresentado por Marouelli (2008).

A leitura realizada em tensiômetros com vacuômetro metálico ou com tensímetros corresponde à soma da tensão matricial com a tensão gravitacional. Assim, para se obter a tensão matricial de água no solo, deve-se subtrair da leitura realizada o valor correspondente à tensão gravitacional, expressa pela equação 2:

$$T_m = L - T_g = L - 0,098 H_{\text{água}} \quad (2)$$

em que T_m é a tensão de água na matriz do solo (kPa), L a leitura no vacuômetro ou tensímetro (kPa), T_g a tensão gravitacional de água no solo (kPa) e $H_{\text{água}}$ a altura da coluna de água no tensiômetro, considerando-se o centro da cápsula (cm).

Blocos de resistência elétrica

Sensores do tipo bloco de resistência elétrica permitem relacionar a tensão de água no solo com a resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos no sensor (bloco). O sensor permanece instalado no solo durante todo o ciclo de desen-

volvimento da cultura e as leituras são geralmente realizadas com um medidor digital portátil, pré-calibrado pelo fabricante.

Existem dois tipos básicos de sensores de resistência elétrica: os blocos de gesso e os do tipo matricial granular. O primeiro tipo é construído de uma liga à base de gesso, enquanto o segundo, por camadas de materiais granulares, gesso, tecido e/ou tela metálica (EVETT, 2007; PEREIRA et al., 2006).

Por ser construído com material poroso, o bloco permite que a água entre ou saia do sensor, à medida que o solo umedece ou seca, sendo controlada pela tensão de água no solo. Assim, quanto menor a tensão de água no solo, mais úmido estará o sensor e mais facilmente a corrente elétrica fluirá entre os eletrodos dentro do sensor.

As principais desvantagens dos blocos de resistência elétrica são: requerem calibração para cada tipo de solo; pode existir grande variabilidade entre sensores; podem ser afetados pela temperatura e concentração de sais na solução do solo; apresentam problema de histerese (variação de leitura durante os processos de umedecimento e secamento). Outro aspecto importante é que os blocos de gesso geralmente atuam na faixa de tensão entre 150 kPa e 600 kPa, e do tipo matricial granular, na faixa de 10 kPa a 200 kPa (EVETT, 2007).

Sistema Irrigas[®] e tensiômetro a gás

Um novo sistema para avaliar a tensão de água no solo foi desenvolvido e patentado pela Embrapa com a marca registrada Irrigas[®] (CALBO, 2002). O sensor é durável, apresenta custo relativamente baixo, é de fácil instalação e leitura, e, praticamente, não requer manutenção. Uma ampla descrição sobre o princípio de funcionamento do sistema é apresentado em Calbo e Silva (2006). Embora teoricamente possam ser construídos com qualquer tensão, comercialmente existem sensores com tensão de referência de 15 kPa, 25 kPa e 40 kPa (Figura 4). A leitura é realizada com o auxílio de um pequeno recipiente com água (Figura 5), indicando se a tensão de água no solo encontra-se abaixo ou acima da tensão de referência do sensor. Recomendações e estratégias de uso para fins de manejo de água em hortaliças são apresentadas por Marouelli e Calbo (2009).

Outro sistema para medir a tensão de água no solo, também desenvolvido e patentado pela Embrapa (CALBO, 2004), é o tensiômetro a gás. Fundamentado



Figura 4. Sistema Irrigas® comercial, na sua forma básica, incluindo cápsula porosa (sensor), tubo de plástico flexível, cuba de leitura e frasco para teste de imersão.

Figura 5. Leitura de sensores Irrigas® instalados em lavoura de pimenta por meio da introdução da cuba de leitura em um frasco com água.



no princípio do Irrigas®, permite medição de tensões de água no solo entre 0 e a tensão crítica de sorção (pressão de borbulhamento) da cápsula porosa utilizada. Para a construção do equipamento, necessita-se basicamente de uma cápsula porosa, uma fonte de ar comprimido e um manômetro com bifurcação, com tensão crítica e capacidade de fornecer ou medir pressão ligeiramente superior à tensão máxima de água a ser determinada no solo (CALBO; SILVA, 2006; CALBO et al., 2008). Diferentemente do tensiômetro comum, o tensiômetro a gás não requer adição de água nem saturação da cápsula porosa ou correção da pressão hidrostática, pois sua cavidade trabalha cheia de ar (CALBO; SILVA, 2006). Estando a cápsula instalada e em equilíbrio hídrico com o solo ou substrato, a tensão é calculada utilizando-se a equação 3:

$$T_m = T_{cs} - P_a \quad (3)$$

em que T_m é a tensão de água na matriz do solo (kPa), T_{cs} a tensão crítica de sorção da cápsula porosa (kPa) e P_a a pressão gasosa aplicada (kPa).

A pressão gasosa aplicada, medida pelo manômetro, é a necessária para forçar a passagem de ar através dos poros da cápsula impregnados com água, sendo tanto maior quanto mais úmido estiver o solo.

O sistema de tensiometria a gás é linear, simples e efetivo, o que tem possibilitado o manejo automatizado da água de irrigação, com o auxílio de pressostatos ajustáveis, temporizadores e válvulas solenoides (CALBO; SILVA, 2006; HIDROSENSE, 2010). O uso do sistema tem sido mais frequente no cultivo protegido de hortaliças e plantas ornamentais, inclusive em substrato, onde o uso de novas tecnologias e soluções, incluindo a automação, é constantemente buscado pelos produtores.

Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção representa a relação entre a umidade do solo e a tensão da água no solo, expressando a quantidade de energia com que um dado teor de água encontra-se retido no solo. É também conhecida como curva característica da água no solo, sendo específica para cada solo. Representa uma das propriedades básicas no estudo dos processos de movimentação e retenção de água no solo, sendo uma importante ferramenta para a elaboração de um bom programa de manejo da água de irrigação. A curva tem formas ligeiramente distintas durante os processos de secamento e umedecimento do solo, fenômeno denominado histerese. Na prática da irrigação, todavia, assume-se a curva de retenção de secamento.

Entre as várias técnicas existentes para sua determinação, o extrator de pressão de Richards tem sido considerado padrão e utilizado como rotina por grande parte dos laboratórios de física de solos, usando amostras com estruturas deformadas ou não deformadas. Apesar de bem mais trabalhoso, o processo que utiliza amostras não deformadas possibilita resultados mais precisos, principalmente na faixa de tensão até 100 kPa (MAROUELLI et al., 1996). Vários métodos para determinação da curva de retenção de água no solo são apresentados por Andrade et al. (2008).

Um dos modelos teóricos mais utilizados para a construção da curva de retenção de água no solo, a partir de dados da relação umidade versus tensão de retenção, é o proposto por Genuchten (1980), descrito pela equação 4:

$$\theta_a = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \times T_m)^n\right]^m} \quad (4)$$

em que θ_a é a umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r a umidade residual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s a umidade de saturação do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), T_m a tensão de água

na matriz do solo (kPa), α a constante com dimensão igual ao inverso da tensão (kPa⁻¹) e n e m são constantes adimensionais de ajuste da equação.

Exemplos de curvas de retenção de água no solo, com indicação dos parâmetros da equação de Genuchten, são apresentados na Figura 6. Os procedimentos para ajuste dos parâmetros da equação estão descritos em Andrade et al. (2008).

Uma das aplicações da curva de retenção é a determinação da disponibilidade atual de água no solo. Assim, com base nos dados de tensão de água no solo obtidos em campo e na curva de retenção produzida previamente em laboratório, pode-se determinar a umidade crítica do solo no momento de irrigar e, por conseguinte, a lâmina de água a ser aplicada por irrigação. Para fins práticos de manejo de irrigação, os valores de umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente podem ser obtidos a partir da curva de retenção.

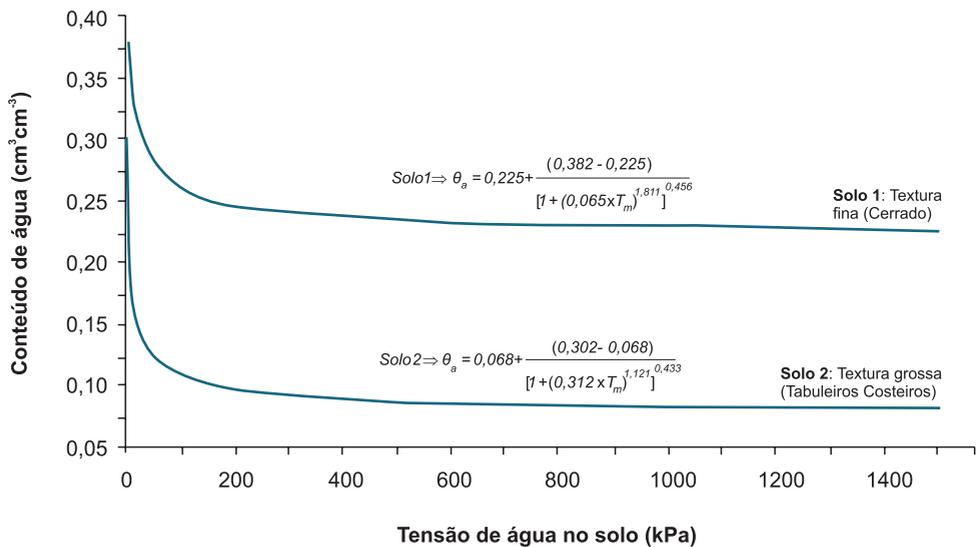


Figura 6. Exemplo de curvas de retenção de água em solo de textura fina, região do Cerrado, DF, e de textura grossa, região dos Tabuleiros Costeiros, BA, com equações ajustadas pelo método de Genuchten.

Disponibilidade de água no solo

O tamanho e a natureza das partículas minerais e o teor de matéria orgânica, bem como o arranjo dos elementos estruturais, constituindo a porosidade ou espaços vazios, dão ao solo características próprias de armazenamento de água. Porém,

sabe-se que nem toda a água armazenada nos macroporos e microporos do solo está disponível para as plantas. Para quantificação da água disponível, parâmetros como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e umidade de irrigação são importantes e precisam ser definidos para cada tipo de solo. Em termos gerais, a textura é o atributo mais intimamente relacionado à capacidade de armazenamento de água; porém, a estrutura e a natureza das partículas do solo podem ser tão ou mais importantes.

A capacidade de campo representa a quantidade de água retida pelo solo em virtude de forças matriciais e capilares, depois que o excesso é drenado livremente pela ação da gravidade, ou seja, representa a condição do solo com 100% de água disponível para as plantas. Embora esse parâmetro possa ser avaliado diretamente no campo, sua determinação tem sido usualmente realizada em laboratório. Valores de umidade do solo na capacidade de campo estão geralmente associados a tensões matriciais da ordem de 5 kPa para solos de textura grossa e de 10 kPa para solos de textura fina (AHUJA; NIELSEN, 1990; REICHARDT, 1988).

O conceito de ponto de murcha permanente representa o limite mínimo de umidade existente no solo, abaixo do qual uma planta em crescimento ativo apresenta perda de turgescência das folhas, sem possibilidade de se recuperar, mesmo quando novamente irrigada e colocada em atmosfera saturada durante a noite. Representa, portanto, a condição do solo com 0% de água disponível para as plantas. Embora o ponto de murcha permanente possa variar com as diferentes espécies de plantas, estágio de desenvolvimento, tipo de solo e condições climáticas, é comumente aceito como o teor de água no solo correspondente à tensão matricial de 1.500 kPa, portanto podendo ser estimado indiretamente em laboratório.

A lâmina de água disponível para as plantas, que pode ser armazenada pelo solo, é aquela contida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Assim, a lâmina total de água disponível, na camada de solo correspondente à profundidade efetivamente explorada pelo sistema radicular da cultura, é calculada pela equação 5:

$$LTD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times Z_r \times f_{Am} \quad (5)$$

em que LTD é a lâmina total de água disponível no solo para as plantas (mm), θ_{CC} a umidade do solo correspondente à capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{PMP} a umidade do solo correspondente ao ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Z_r a espessura da camada de solo, correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (mm), e f_{Am} a fração de área molhada (decimal).

Segundo Keller e Bliesner (1990), o uso do conceito de fração de área molhada possibilita estimar a lâmina de água disponível no solo em sistema de irrigação localizada. A fração de área molhada deve expressar o valor médio de molhamento ao longo do perfil de solo equivalente à profundidade efetiva do sistema radicular. Para irrigação por aspersão, e mesmo para irrigação por sulco, quando o espaçamento entre sulcos permite que as frentes de molhamento se encontrem logo abaixo da superfície do solo, a fração de área molhada é igual a 1 ($f_{Am} = 1$).

Para hortaliças irrigadas por gotejamento, Talens (1998) recomendou uma fração molhada mínima de 0,50. Todavia, para hortaliças com maior espaçamento entre fileiras de plantas, como melancia e abóbora, tem-se utilizado $f_{Am} = 0,30$; para hortaliças com menor espaçamento, como alface e cenoura, $f_{Am} = 0,95$. Para fruteiras irrigadas por gotejamento ou por microaspersão, Talens (1998) recomendou uma fração mínima molhada entre 0,30 e 0,40 para solos argilosos e entre 0,40 e 0,50 para solos arenosos. Para uma mesma configuração de emissores, a fração de área molhada em solos arenosos é normalmente menor que em solos argilosos.

Deve-se notar que a umidade do solo na equação 5 é expressa em volume ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). No entanto, é comum a umidade ser expressa em massa seca (gravimétrica). Assim, para possibilitar a determinação da lâmina (ou volume) de água, faz-se necessário multiplicar a umidade do solo pela sua densidade global, que é tecnicamente chamada de densidade do solo. Nesse caso, rearranjando a equação 5, tem-se a equação 6:

$$LTD = (U_{CC} - U_{PMP}) \times D_g \times Z_r \times f_{Am} \quad (6)$$

em que U_{CC} é a umidade gravimétrica do solo correspondente à capacidade de campo (g g^{-1}), U_{PMP} a umidade gravimétrica do solo correspondente ao ponto de murcha permanente (g g^{-1}) e D_g a densidade global do solo (g cm^{-3}).

Partindo-se de uma situação com o solo na condição de capacidade de campo (θ_{CC}), a umidade reduz à medida que o solo vai perdendo água por evapotranspiração. Para nenhuma das fruteiras e hortaliças, no entanto, é recomendável deixar o reservatório do solo se “esvaziar” até atingir a condição de ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). Existe para cada cultura um valor de umidade crítica abaixo do qual a produtividade começa a ser prejudicada. A umidade crítica do solo, momento em que se deve irrigar uma determinada cultura sob pena de comprometer sua produção, é obtida experimentalmente; é função da espécie cultivada, do clima, do tipo de solo e até mesmo da cultivar, estando associada à “força” com que a água é

retida pela matriz do solo. Conhecida a umidade crítica, torna-se simples determinar a lâmina real de água no solo para as plantas, também conhecida como lâmina de água facilmente disponível para as plantas, utilizando-se a equação 7:

$$LRD = (\theta_{CC} - \theta_{Ulc}) \times Z_r \times f_{Am} \quad (7)$$

em que LRD é a lâmina de água real disponível no solo para as plantas (mm) e θ_{Ulc} a umidade crítica do solo para fins de irrigação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Quando se expressa a LRD em relação à LTD , obtém-se um número adimensional, comumente denominado de fator de reposição de água (f_r), que representa a fração da LTD que pode ser utilizada pela cultura antes que ocorra deficit hídrico que comprometa a produção. Como a determinação de θ_{Ulc} é difícil de ser obtida experimentalmente, pois é altamente dependente da capacidade de armazenamento e da retenção de água no solo, além da espécie cultivada, das condições edafoclimáticas e do sistema de irrigação, a LRD é geralmente determinada utilizando-se a equação 8:

$$LRD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times Z_r \times f_{Am} \times f_r \quad (8)$$

em que f_r é o fator de reposição de água ao solo (decimal).

Além de depender da cultura e do estágio de desenvolvimento das plantas, f_r é influenciado pela taxa de evapotranspiração, pelo tipo de solo e pelo sistema de irrigação. Isso porque a taxa de extração de água do solo pelas plantas é afetada diretamente pela tensão de água e pela condutividade hidráulica do solo (ALLEN et al., 1998). Assim, quanto maior a ETc e mais argiloso for o solo, menor deverá ser o valor de f_r . Em razão de questões operacionais e da forma com que a água é aplicada às plantas, f_r também é dependente do sistema de irrigação. Nesse caso, para uma mesma cultura e condições de solo e clima, deve-se considerar valor menor de f_r para sistemas por gotejamento, por ser um sistema de irrigação fixo que não molha a parte aérea, e maior para sistemas por sulco, por apresentarem limitações operacionais que dificultam irrigações frequentes.

Embora sujeito às mesmas variáveis que afetam o θ_{Ulc} , o fator f_r é muito mais estável, ou seja, um valor de f_r recomendado para uma determinada cultura pode ser utilizado, dentro de certos limites, para diferentes condições de cultivo, o que não ocorre com o θ_{Ulc} . Ademais, existem na literatura recomendações de valores de f_r para diferentes culturas (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; KASSAM, 1986; MAROUELLI et al., 2008c).

Valores de f_r para diferentes culturas são apresentados na Tabela 7. Dentro de cada faixa de f_r , o menor valor deve ser considerado para solos de textura grossa (arenosa), enquanto o maior, para solos de textura fina (argilosa). Esses valores são indicados para $ETc \approx 5 \text{ mm dia}^{-1}$. Para condições em que $4 \text{ mm dia}^{-1} > ETc > 6 \text{ mm dia}^{-1}$, f_r pode ser ajustado segundo Allen et al. (1998), utilizando-se a equação 9:

$$f_{r(\text{cor})} = f_{r(\text{tabela 7})} + 0,04(5 - ETc) \quad (9)$$

em que $f_{r(\text{cor})}$ é o fator de reposição de água ao solo corrigido (decimal) e $f_{r(\text{tabela 7})}$ o fator de reposição de água ao solo fornecido pela Tabela 7 (decimal).

Tabela 7. Fator de reposição de água ao solo (f_r) para hortaliças e fruteiras irrigadas por aspersão e sulco, para $ETc^1 \approx 5 \text{ mm dia}^{-1}$.

Cultura	$f_r^{(2)}$	Cultura	$f_r^{(2)}$
Hortaliça			
Abóbora-seca	0,30–0,40	Feijão-vagem	0,40–0,50
Alface	0,25–0,35	Folhosas em geral	0,25–0,35
Alho	0,25–0,35	Lentilha	0,55–0,70
Batata	0,30–0,40	Melancia	0,35–0,45
Batata-doce	0,55–0,70	Melão	0,40–0,50
Berinjela	0,40–0,50	Milho-doce	0,45–0,55
Beterraba	0,45–0,55	Morango	0,20–0,35
Brócolis	0,35–0,50	Pepino	0,45–0,55
Cebola	0,25–0,35	Pimentão	0,30–0,40
Cenoura	0,30–0,40	Repolho	0,35–0,50
Couve-flor	0,35–0,45	Tomate industrial	0,40–0,50
Ervilha-seca	0,55–0,70	Tomate de mesa	0,40–0,60
Fruteiras			
Abacate	0,45–0,60	Goiaba	0,30–0,40
Abacaxi	0,45–0,55	Manga	0,40–0,55
Banana	0,25–0,40	Maracujá	0,25–0,35
Caju	0,55–0,65	Uva de mesa	0,30–0,40
Citros	0,45–0,55	Uva vinífera	0,40–0,50

⁽¹⁾ Para $4 \text{ mm dia}^{-1} < ETc < 6 \text{ mm dia}^{-1}$, o valor de f_r pode ser ajustado por: $f_{r(\text{cor})} = f_{r(\text{tabela})} + 0,04(5 - ETc)$.

⁽²⁾ Os menores valores de f_r são para solos de textura grossa, enquanto os maiores são para os de textura fina.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998), Coelho et al. (2000) e Marouelli et al. (2008c).

Profundidade efetiva do sistema radicular

Em irrigação, normalmente não se considera todo o perfil do solo explorado pelo sistema radicular da cultura, mas apenas a profundidade efetiva, que contém cerca de 80% do sistema radicular. Sua determinação em condições de campo é fundamental

para fins de manejo de irrigação. Valores superestimados acarretam a aplicação de lâminas de água e a adoção de turnos de rega maiores que os recomendados, com consequências indesejáveis. Por outro lado, valores subestimados resultam em irrigações mais frequentes e com lâminas menores, podendo resultar em maior uso de mão de obra e menor aprofundamento das raízes, entre outros problemas.

Valores de profundidade efetiva do sistema radicular para várias culturas são apresentados por Allen et al. (1998), Doorenbos e Pruitt (1977) e Marouelli et al. (1996, 2008c). Na Tabela 8, são apresentados valores médios da profundidade efetiva para algumas hortaliças e fruteiras durante o período de máxima cobertura do solo, cultivadas em solos de textura média, férteis e com drenagem livre.

Muitos fatores, como textura e fertilidade do solo, práticas culturais, profundidade e grau de compactação dos solos, irrigações muito frequentes e horizontes fortemente diferenciados, podem afetar consideravelmente o desenvolvimento radicular das plantas. É aconselhável avaliar o sistema radicular nos diferentes estádios de desenvolvimento e no próprio local de cultivo.

Existem vários métodos para avaliar a profundidade efetiva de raízes (ATKINSON; MACKIE-DAWSON, 1991). Todos são trabalhosos e nenhum pode ser considerado

Tabela 8. Valores de profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r) durante o estágio de máxima cobertura do solo.

Espécie	Z_r (mm) ⁽¹⁾	Espécie	Z_r (mm) ⁽¹⁾
Hortaliça			
Abóbora	350–600	Feijão-vagem	350–600
Alho	300–500	Folhosas	200–400
Batata	300–500	Lentilha	450–700
Batata-doce	450–700	Melancia	300–700
Brássicas	300–600	Melão	300–600
Beterraba	300–600	Milho-doce	450–700
Cebola	300–500	Morango	200–350
Berinjela	350–600	Pepino	350–600
Cenoura	300–500	Pimentão	350–600
Ervilha	450–700	Tomate	350–700
Fruteira			
Abacate	750–1.500	Goiaba	600–1.200
Abacaxi	300–600	Mamão	350–600
Acerola	500–800	Manga	600–1.200
Banana	500–800	Maracujá	350–700
Citros	600–1.400	Uva	600–1.200

⁽¹⁾ A profundidade de raízes varia grandemente conforme as condições de solos. Valores mais confiáveis devem ser determinados por meio de observações de campo para cada estágio da cultura.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998), Coelho et al. (2000) e Marouelli et al. (1996, 2008c).

como padrão e indicado para todas as situações. Na prática, a abertura de uma trincheira perpendicularmente à linha de plantio e a avaliação visual do sistema radicular, nas diferentes fases de desenvolvimento das plantas, podem dar uma ideia aproximada das profundidades a serem consideradas (MAROUELLI et al., 2008c). Para uma melhor precisão desse método visual, devem-se afixar à parede da trincheira linhas verticais e horizontais a cada 10 cm, por exemplo, formando um perfil reticulado. A concentração de raízes, dentro de cada retícula, pode ser avaliada utilizando-se notas de 0 (ausência de raízes) a 5 (máxima concentração) (Figura 7). A profundidade efetiva é estimada ponderando-se as notas em todas as retículas com raízes. A mesma estrutura reticulada pode ser utilizada para se avaliar com mais precisão a profundidade efetiva das raízes das plantas. Para tanto, é preciso obter imagens digitais de cada retícula e utilizar um programa de computador, como o Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo (Siarcs) (CRESTANA et al., 1994), para avaliação da distribuição e concentração de raízes no perfil do solo.



Foto: Waldir Aparecido Marouelli

Figura 7. Trincheira aberta perpendicularmente à linha de plantio de tomate para avaliação visual da profundidade efetiva do sistema radicular, durante o estágio de produção, com auxílio de retículas de 10 cm x 10 cm; a profundidade efetiva foi estimada em 45 cm.

Local e profundidade de amostragem de solo ou de instalação de sensores

A amostragem de solo e/ou a instalação de sensores para avaliação do teor ou tensão da água no solo devem ser feitas na zona de absorção de água pelo sistema radicular da planta, o que demanda conhecimento dos padrões de distri-

buição espacial das raízes no solo. Também não se deve instalar os sensores em apenas um local da lavoura irrigada, pois existe grande variabilidade espacial da umidade do solo, mesmo em áreas com solo e plantas aparentemente uniformes. Essa variabilidade se deve a diferenças de textura e fertilidade do solo, variações de topografia do terreno, distribuição irregular de água pelo sistema de irrigação e desenvolvimento irregular das plantas (MAROUELLI; CALBO, 2009). Além disso, deve-se considerar a própria precisão do método de amostragem e o tipo de sensor utilizado, além dos cuidados na instalação de cada sensor.

Em uma unidade de irrigação, caracterizada por uma área contínua com plantas da mesma idade e irrigadas pelo mesmo sistema, a amostragem ou instalação dos sensores deve ser realizada em pelo menos três pontos (estações de controle) e, no mínimo, em duas profundidades (ALBUQUERQUE, 2008; STEGMAN et al., 1983). As estações de controle devem ficar em locais representativos da unidade de irrigação. Segundo Marouelli (2008) e Marouelli e Calbo (2009), não devem ser em locais onde ocorra baixa demanda hídrica, como em lugares sem plantas, sombreados ou com plantas com problemas de crescimento, ou ainda onde possa haver acúmulo de água, como em terraços e depressões do terreno. Deve-se fazer junto a plantas saudas, com crescimento normal. Se a área apresentar mais de um tipo de solo e não puder ser subdividida em unidades de irrigação distintas, as estações de controle devem ser localizadas nas partes onde predominar solo de textura mais grossa. Isso deve minimizar os problemas de falta de água no solo para as plantas, que ocorrem primeiramente em solos mais arenosos, e também os problemas de excesso de água, que ocorrem primeiramente em solos mais argilosos.

Quanto à profundidade de instalação em cada estação de controle, os sensores devem ser posicionados em, pelo menos, duas profundidades, conforme informado anteriormente, sendo um a cerca de 50% da profundidade efetiva do sistema radicular e outro no limite inferior do sistema radicular (ALBUQUERQUE, 2008; MAROUELLI, 2008). A média das leituras das estações de controle, considerando-se os sensores mais próximos da superfície, deve ser utilizada para indicar quando irrigar. A média das leituras dos sensores mais profundos, considerando-se as estações de controle de uma mesma unidade de irrigação, permite avaliar se a lâmina de água aplicada é excessiva ou insuficiente, ao comparar os teores reais de umidade lidos com os teores de umidade ao nível da capacidade de campo dos solos em questão. É importante observar que as profundidades dos sensores devem ser ajustadas à medida que as raízes se aprofundam.

Para hortaliças em geral, os sensores raso e profundo devem ser instalados lado a lado, ao longo da linha de plantio, entre 10 cm e 20 cm da planta, sendo o menor valor para plantas de menor porte e solos mais arenosos. No caso de irrigação por gotejamento, instalar entre 10 cm e 20 cm de distância do gotejador, sendo o menor valor para solos com faixa molhada na superfície inferior a 15 cm de raio (MAROUELLI, 2008). No caso de irrigação por sulco, os sensores devem ser posicionados a 25% do comprimento final dos sulcos e no terço médio da altura do talude do camalhão formado entre sulcos.

Para fruteiras, os sensores devem ser instalados na direção da fileira de plantas, próximo ao caule, em razão da distância efetiva de atuação das raízes, do espaçamento entre plantas, e do sistema e da frequência de irrigação. A profundidade de instalação depende da profundidade efetiva do sistema radicular. Segundo Coelho Filho et al. (2006) e Silva et al. (2008), a região ideal para a instalação dos sensores de umidade ou de tensão de água do solo para indicar quando irrigar situa-se no ponto do volume do solo em que coincide a profundidade e distância efetivas do sistema radicular (profundidade e distância em relação à planta, contendo cerca de 80% das raízes) com o ponto da profundidade e distância efetivas em que ocorre extração efetiva de água (cerca de 80% da extração total).

De modo geral, para fruteiras irrigadas por sistemas localizados, os sensores devem ser posicionados a uma distância equidistante entre o emissor e a planta, na metade da profundidade efetiva do sistema radicular. Para fruteiras com maior espaçamento entre plantas, a exemplo de laranja e limão irrigados por microaspersão, a região do sistema radicular entre 40 cm e 50 cm de distância da planta e a profundidade entre 25 cm e 50 cm são consideradas as mais adequadas para a instalação do sensor a ser utilizado para indicar quando irrigar. Para fruteiras com menor espaçamento entre plantas (bananeira, aceroleira, maracujazeiro, etc.), os sensores podem ser posicionados entre 15 cm e 50 cm do caule, na direção planta-emissor, e entre 20 cm e 40 cm de profundidade.

Indicadores de manejo de irrigação com base na atmosfera

Medidas diretas de algumas variáveis climáticas são de fundamental importância para o manejo da água de irrigação, pois permitem estimar, de forma indireta, a evapotranspiração da cultura (*ETc*) e, conseqüentemente, a quantidade de água

a ser reposta ao solo entre duas irrigações consecutivas, desde que a precipitação efetiva seja subtraída.

Similarmente aos indicadores de manejo com base na planta, a determinação da evapotranspiração da cultura a partir de fatores climáticos, por si só, não possibilita determinar quando as irrigações devem ser realizadas. Essa limitação é facilmente resolvida caso se disponha de informações sobre a capacidade de retenção de água pelo solo. Nesse caso, o momento de irrigar pode ser definido de duas formas: a) estabelecendo-se um turno de rega fixo para cada estágio de desenvolvimento da cultura a partir da relação entre a lâmina real de água disponível no solo (*LRD*) e a *ETc*; b) por meio do balanço de água no solo, sendo as irrigações realizadas quando o somatório das evapotranspirações (menos as precipitações efetivas) atingir o valor de *LRD*.

A *ETc* pode ser determinada de forma direta, por meio de lisímetros. No entanto, em razão dos custos de instalação e dos cuidados necessários na operação, os lisímetros são basicamente utilizados em experimentação agrícola. Permitem determinar, de maneira indireta, os coeficientes de cultura (*Kc*) para posterior utilização na estimativa da *ETc*, utilizando-se a equação 10:

$$ETc = Kc \times ETo \quad (10)$$

em que *ETc* é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}), *Kc* o coeficiente de cultura (adimensional) e *ETo* a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

A *ETc* e o *Kc* na equação 10 representam a evapotranspiração para condições normais de desenvolvimento da cultura, ou seja, sem estresse hídrico ou salinidade e em condições em que cerca de 100% da superfície do solo é molhada durante a irrigação, como é o caso dos sistemas de aspersão.

Em condições normais de cultivo, a *ETc* atual ou real pode ser menor que a determinada na equação 10. O estresse hídrico e o salino reduzem a componente da transpiração. Já o molhamento de parte da superfície do solo reduz a componente da evaporação. Assim, para condições em que a evapotranspiração é limitada por condições de cultivo ou manejo, a *ETc* atual pode ser calculada pela equação 11 (ALLEN et al., 2007):

$$ETc_{\text{atual}} = Kc_{\text{atual}} \times ETo \quad (11)$$

em que ETc_{atual} é a evapotranspiração da cultura na condição atual ou real (mm dia^{-1}) e Kc_{atual} o coeficiente de cultura na condição atual ou real (adimensional).

A evapotranspiração de referência (ETo), que expressa a influência do clima sobre a cultura de referência (grama-batatais), é determinada por métodos que se baseiam em dados climáticos. Utilizam desde equações simples, com base somente em valores médios de temperatura do ar, por exemplo, até equações mais complexas, baseadas em modelos físicos, passando por métodos evaporimétricos, como o do tanque Classe A. Uma ampla revisão sobre os principais métodos para determinação indireta de ETc pode ser encontrada em Gomide e Maeno (2008), Jensen et al. (1990), Lascano (2007) e Pereira et al. (1997).

A escolha do método a ser utilizado para determinação de ETo depende da precisão desejada e da disponibilidade de dados climáticos. Por exemplo, para manejo de água em tempo real, o método combinado de Penman-Monteith, segundo parametrização da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (ALLEN et al., 1998), considerado como padrão internacional, é o mais recomendado.

O método do tanque Classe A, apesar de indicado para estimativa de ETo para períodos acima de 5 dias, dada sua praticidade, baixo custo e boa precisão, era muito usado para fins de manejo em tempo real até a chegada das estações agrometeorológicas automáticas. Métodos como os de Blaney-Criddle-FAO, Radiação-FAO e Jensen-Haise (referência alfafa) são recomendados para períodos acima de 5 dias, enquanto métodos como os de Hargreaves-Samani e Priestley-Taylor são recomendados para períodos acima de 10 dias (DOORENBOS; PRUITT, 1977; JENSEN et al., 1990). Esses métodos não devem ser utilizados para manejo em tempo real, especialmente quando os intervalos entre irrigações são menores que o período mínimo recomendado para uso do método. Todavia, podem ser utilizados na determinação da ETc para fins de projeto de irrigação e estabelecimento de calendários de irrigação, em que os turnos de rega e as lâminas de irrigação são prefixados com base em dados históricos de evapotranspiração e de armazenamento de água no solo.

Coeficiente de cultura

Coeficientes de cultura (Kc) são determinados experimentalmente para cada cultura durante seus diferentes períodos de desenvolvimento. Segundo Pereira e Allen (1997), os valores de Kc integram três características distintas da superfície evaporante (cultura-solo): a) altura e morfologia da cultura, que afetam a rugosidade e a resistência aerodinâmica da superfície evaporante; b) resistência de superfície evaporante, que é afetada pela área foliar, fração de área vegetada,

idade e condição das folhas, além da umidade na superfície do solo; c) albedo da superfície evaporante.

Numerosos estudos têm sido realizados e publicados em todo o mundo contendo valores de K_c para muitas culturas. Os valores geralmente representam a média temporal dos efeitos conjugados da transpiração da cultura e da evaporação do solo, incluindo os efeitos de umedecimento do solo pela irrigação ou precipitação. Assim, segundo Allen et al. (1998), são denominados de K_c médio para condições normais de desenvolvimento da cultura, ou seja, sem estresse hídrico ou salino e com molhamento de toda a superfície do solo. Adicionalmente, o valor de K_c também depende do método utilizado para a determinação de ET_o , pois é obtido pela relação entre ET_c e ET_o . Os valores de K_c tabelados disponíveis na literatura técnica são comumente para uso com a equação de Penman-Monteith da FAO.

De acordo com a metodologia da FAO para a estimativa dos valores de K_c (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977), o ciclo de desenvolvimento de culturas anuais é dividido em quatro estádios:

- Estádio inicial (I) – do plantio ou transplante de mudas até o estabelecimento inicial das plantas (cobertura do solo < 10%).
- Estádio vegetativo (II) – do final do estágio I até 70% a 80% do máximo desenvolvimento da cultura (plena floração, no caso de espécies que florescem).
- Estádio de produção ou reprodutivo (III) – do final do estágio II até o início da maturação ou pré-colheita (caso de espécies que são colhidas antes de completarem o ciclo).
- Estádio de maturação ou pré-colheita (IV) – do final do estágio III até a colheita.

No caso de espécies anuais do tipo fruto, como a berinjela, o pimentão e o tomate, em que é comum a ocorrência de um período em que existem flores, frutos verdes e maduros, o que requer a realização de várias colheitas, o término do estágio de produção deve ser por ocasião do início da maturação dos frutos a serem colhidos na antepenúltima colheita. Para as hortaliças do tipo tubérculo, como a batata, o estágio de produção é definido pelo início da formação de tubérculos até o momento em que atingem o máximo desenvolvimento. Para as brássicas (repolho, couve-flor, etc.), o estágio de produção compreende o período entre o início de formação das cabeças ou inflorescências e o seu máximo desenvolvimento. Para as hortaliças do tipo raiz, como a cenoura, o estágio de

produção vai do desenvolvimento (engrossamento) acentuado de raízes até o início da senescência da parte aérea. Para as folhosas (alface, rúcula, etc.), o estágio de produção deve abranger o período entre 80% do máximo desenvolvimento da planta até uma semana antes da colheita (MAROUELLI et al., 2008c). Para o caso das cucurbitáceas (melão, melancia, etc.), o máximo desenvolvimento das plantas ocorre entre 20 e 50 dias, que coincide com o início da floração e frutificação.

Os períodos de desenvolvimento e de produção das fruteiras variam muito entre espécies. Fruteiras como o mamoeiro e a bananeira, por exemplo, apresentam todos os estádios bem-definidos, conforme apresentado anteriormente, do plantio até a primeira colheita. A partir daí, há uma sobreposição entre os estádios vegetativos de produção e de maturação, sendo mais seguro, para fins de manejo de água, considerar um valor de K_c equivalente ao do estágio de produção (III). No caso do maracujazeiro-amarelo, cujo ciclo pode chegar a até três anos e as plantas possuem ciclos alternados de vegetação e de produção, dependendo da região, o crescimento e a floração podem ocorrer de forma quase contínua, podendo-se assim utilizar um valor médio de K_c .

Fruteiras arbóreas, como os citros e a mangueira, por outro lado, apresentam um estágio vegetativo prolongado, que pode se estender até o terceiro ano depois do plantio. A partir daí, a cultura entra num período intercalado por ciclos de produção e de crescimento vegetativo. Assim, cada colheita é seguida de indução floral, floração, crescimento, desenvolvimento e maturação dos frutos. No período de crescimento vegetativo, a área foliar e as características morfológicas das plantas podem sofrer alterações por podas de manutenção ou podas vegetativas drásticas. Dessa forma, o valor de K_c para fruteiras varia de ano para ano, à medida que as plantas se desenvolvem, e também dentro de cada ano, em virtude da alternância entre os ciclos de produção e vegetativo, períodos de podas ou repouso fenológico que antecedem a floração.

Na metodologia proposta pela FAO (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977), a curva de K_c é ajustada a partir de três pontos: K_c médio durante o estágio inicial ($K_{c_{ini}}$), K_c médio durante o estágio de produção ($K_{c_{pro}}$) e K_c final do estágio de maturação ($K_{c_{fin}}$), conforme representado na Figura 8.

Na Tabela 9, são apresentados valores de K_c médios dos três estádios fenológicos ($K_{c_{ini}}$, $K_{c_{pro}}$ e $K_{c_{fin}}$) para as principais hortaliças e fruteiras, para uso com a equação de Penman-Monteith, da FAO. Os valores de K_c apresentados na Tabela 9 são para condições de clima subúmido, ou seja, umidade relativa mínima do ar da ordem de 45% e velocidade do vento de 2 m s^{-1} a $2,0 \text{ m}$ de altura. Para ajustes nos valores de K_c , em razão das condições climáticas distintas – o que nem sempre se faz necessário na prática –, deve-se consultar procedimento apresentado por Allen et al. (1998).

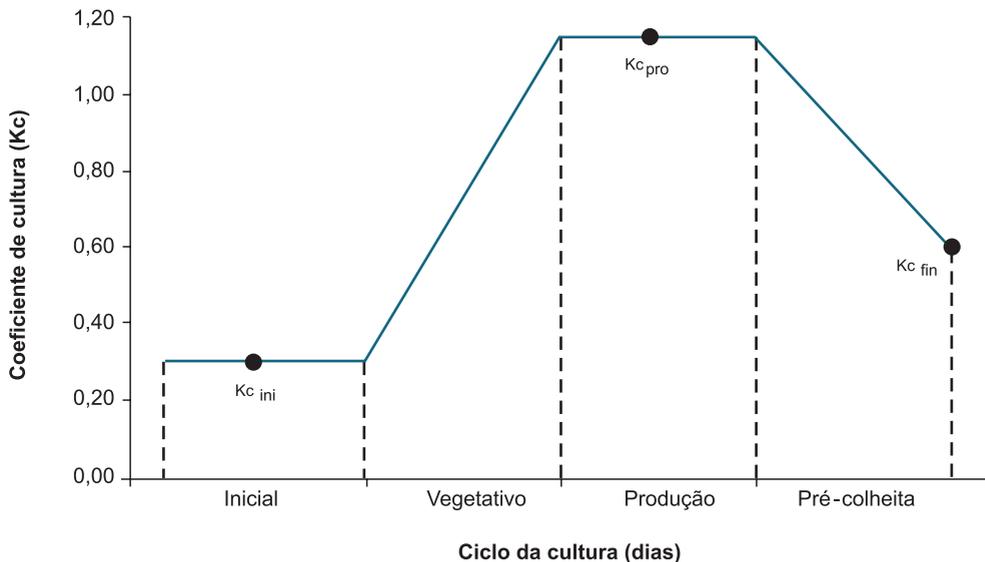


Figura 8. Modelo teórico da curva de coeficiente de cultura (K_c), com indicação dos estádios de desenvolvimento da cultura.

Fonte: Allen et al. (1998).

A ET_c , durante o estágio inicial, é função, predominantemente, da evaporação do solo em virtude da pouca cobertura vegetal. Dessa forma, é muito dependente da frequência de irrigação, da demanda evaporativa da atmosfera e do tipo do solo. Recomenda-se determinar um valor mais preciso de $K_{c_{ini}}$ utilizando-se a Figura 9, em que o $K_{c_{ini}}$ é função da ET_o , da textura e da frequência de molhamento da superfície do solo. Segundo Allen et al. (2007), os valores de $K_{c_{pro}}$ e $K_{c_{fin}}$ são menos afetados pela frequência de irrigação, pois a vegetação durante esses estádios cobre grande parte da superfície do solo.

Tabela 9. Valores médios de coeficiente de cultura (K_c) para plantas sem estresse, em condições de clima subúmido⁽¹⁾ ($UR_{min} \approx 45\%$, $U_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$), conforme o estágio de desenvolvimento, para uso com a equação de Penman-Monteith-FAO.

Cultura	Estádio da cultura ⁽²⁾		
	$K_{c_{ini}}$ ⁽³⁾	$K_{c_{pro}}$	$K_{c_{fin}}$
Hortaliça			
Abóbora-seca	0,50	1,00	0,75
Alface	0,70	1,05	0,95
Alho	0,65	1,00	0,70
Batata	0,50	1,15	0,75/0,40 ⁽⁵⁾
Batata-doce	0,50	1,15	0,65
Berinjela	0,60	1,05	0,85

Continua...

Tabela 9. Continuação.

Cultura	Estádio da cultura ⁽²⁾		
	Kc _{ini} ⁽³⁾	Kc _{pro}	Kc _{fin}
Beterraba	0,50	1,05	0,95
Brócolis	0,65	1,05	0,95
Cebola	0,65	1,05	0,75
Cenoura	0,70	1,05	0,95
Couve-flor	0,65	1,05	0,95
Ervilha	0,45	1,00/1,15 ⁽⁴⁾	1,00/0,30 ⁽⁶⁾
Feijão-vagem	0,40	1,05/1,15 ⁽⁴⁾	0,90
Lentilha	0,40	0,95	0,30
Melancia	0,40	1,00	0,75
Melão	0,50	1,00/1,10 ⁽⁴⁾	0,70
Milho-doce	0,30	1,15	1,05
Morango	0,40	0,90	0,75
Pepino	0,50	1,00/1,15 ⁽⁴⁾	0,75
Pimentão	0,60	1,05/1,15 ⁽⁴⁾	0,90
Repolho	0,65	1,05	0,95
Tomate de mesa	0,60	1,15/1,20 ⁽⁴⁾	0,85
Tomate industrial	0,55	0,95	0,60
Fruteiras			
Abacate	0,60	0,85	0,75
Abacaxi	0,50	1,05	0,90
Banana 1º ano	0,50	1,10	1,00
Banana 2º ano	1,00	1,20	1,10
Caju	0,55	0,65	0,60
Citros	0,85	0,85	0,85
Goiaba	0,70	0,84	0,75
Mamão	0,55	1,20	0,90
Manga	0,40	0,95	0,75

Continua...

Tabela 9. Continuação.

Cultura	Estádio da cultura ⁽²⁾		
	Kc_{ini} ⁽³⁾	Kc_{pro}	Kc_{fin}
Maracujá	0,55	1,20	0,85
Uva de mesa	0,30	0,85	0,45
Uva vinífera	0,30	0,70	0,45

⁽¹⁾ Para condições distintas de clima, o valor de Kc pode ser ajustado segundo Allen et al. (1998).

⁽²⁾ Kc_{ini} representa o valor médio de Kc durante o estágio inicial, Kc_{pro} durante o estágio de produção e Kc_{fin} no final do estágio de maturação ou pré-colheita.

⁽³⁾ Valor de Kc_{ini} para condições médias de cultivo. Para estimativa mais precisa, utilizar a Figura 9.

⁽⁴⁾ O segundo número refere-se à condição de cultivo tutorado de plantas.

⁽⁵⁾ O segundo número refere-se à situação de dessecação das ramas.

⁽⁶⁾ O primeiro número refere-se à ervilha-verde e o segundo, à ervilha-seca.

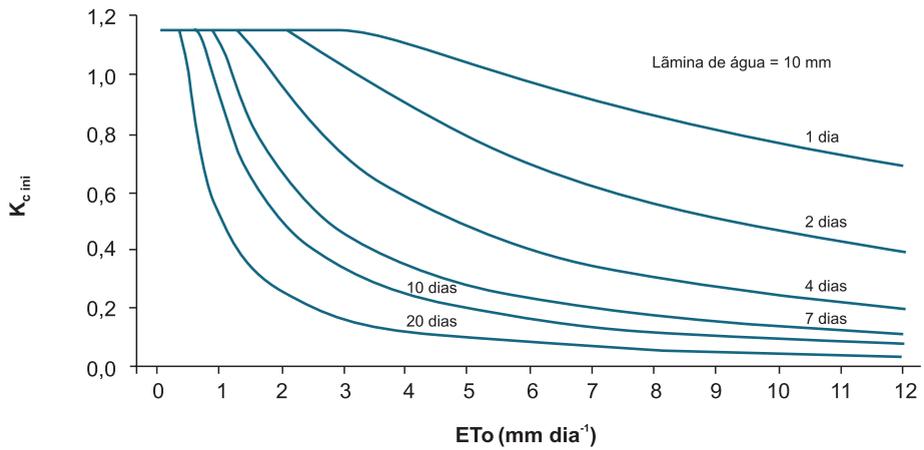
Obs.: UR_{min} é a umidade relativa mínima do ar e U_2 é a velocidade do vento a 2 m da superfície.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998), Coelho et al. (2000), Ferreira (2004), Marouelli et al. (2008c), Montenegro et al. (2004), Pontes (2002) e Souza et al. (2009).

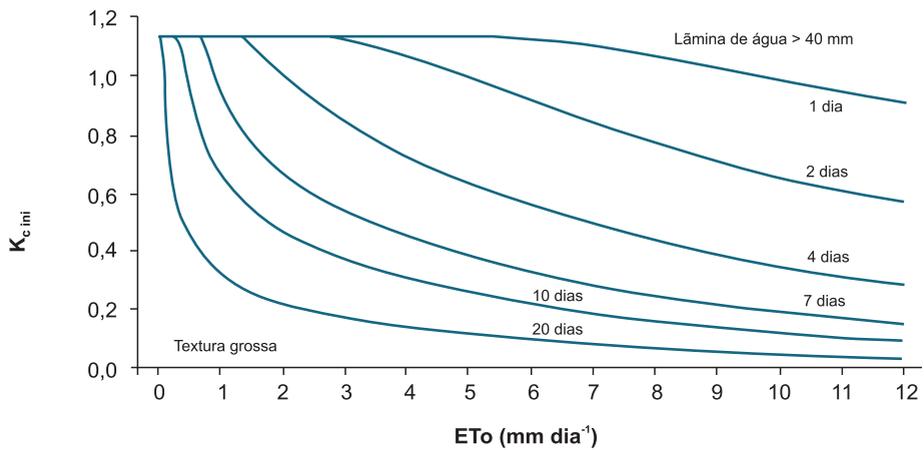
Diferentes fatores podem afetar a magnitude de Kc , dependendo das condições predominantes de cultivo, tais como diferenças de desenvolvimento da cultura resultantes de variações climáticas ou datas de plantio, resistência estomática em resposta a condições atmosféricas adversas, cultivares/variedades e morfologia da cultura, fertilidade do solo, ocorrência de pragas e doenças, intervalo entre irrigações, disponibilidade de água, tipo de solo e densidade de plantio (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977; PEREIRA et al., 1997).

Coefficientes de cultura são empíricos, úteis à estimativa indireta de ETc , e, por mais precisos que sejam os valores de Kc utilizados, o usuário deve estar ciente de que erros ocorrem e são cumulativos. Assim, medições periódicas do teor de água no solo, dentro e logo abaixo da zona radicular da cultura, possibilitam verificar problemas de excesso ou falta de água, o que permite inclusive ajustes nos valores de Kc a serem usados em safras seguintes.

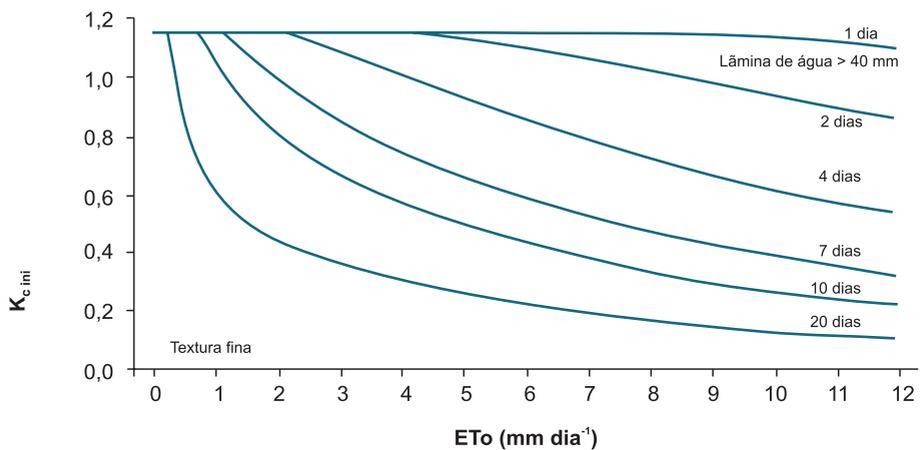
Existem condições de cultivo que diferem substancialmente das condições-padrão para as quais os valores de Kc apresentados na Tabela 9 são recomendados. Primeiramente, a umidade do solo na zona radicular pode ser insuficiente para manter a plena transpiração das plantas, o que pode ser resultante, por exemplo, de uma estratégia de manejo em que a cultura é submetida a deficit hídrico controlado durante estádios específicos de desenvolvimento, como é o caso de indução floral em algumas espécies. Outra situação ocorre quando a ETc é limitada em virtude de o sistema de irrigação não molhar toda a superfície do solo, como no caso do gotejamento e da microaspersão localizada. Para tais condições, o valor atual de Kc (Kc_{atual}) pode ser determinado pela equação 12.



A



B



C

Figura 9. Valores de K_c médios durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura ($K_{c,ini}$), conforme a evapotranspiração de referência (ETo) e intervalo entre irrigações para todos os tipos de solo quando a lâmina de irrigação é de 10 mm (A), solos de textura grossa e lâmina de irrigação acima de 40 mm (B), e solos de texturas média e fina e lâmina de irrigação acima de 40 mm (C).

Fonte: Allen et al. (1998).

$$K_{c_{atual}} = K_s \times K_L \times K_C \quad (12)$$

em que $K_{c_{atual}}$ é o coeficiente atual de cultura (adimensional), K_s o coeficiente de ajuste em virtude do deficit de água no solo (adimensional) e K_L o coeficiente de ajuste em decorrência da aplicação localizada da água (adimensional).

Segundo Allen et al. (1998), a transpiração da cultura é muito pouco afetada quando a umidade de solo encontra-se entre a capacidade de campo e a umidade crítica para a cultura (θ_{Uic}). Contudo, quando a umidade do solo atinge valores abaixo da θ_{Uic} , a redução da ET_c , e, portanto, de K_c , aproxima-se a um modelo linear. Com base no modelo linear, Pereira e Allen (1997) propuseram que a relação para K_s , quando a umidade atual do solo for menor que a θ_{Uic} , pode ser descrita pela equação 13:

$$K_s = \frac{(\theta_a - \theta_{cc})}{(\theta_{Uic} - \theta_{cc})} \quad (13)$$

em que θ_a é a umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

O valor de θ_{Uic} pode ser determinado a partir da curva de retenção de água no solo ou utilizando-se a equação 14, obtida a partir das equações 5 e 8:

$$\theta_{Uic} = \theta_{cc} - (\theta_{cc} - \theta_{PMP}) f_r \quad (14)$$

Bernardo et al. (2005) relataram que a $ET_{c_{atual}}$ mantém-se acima de 90% da potencial enquanto a umidade do solo estiver acima de um terço da água disponível no solo, caindo rapidamente, de forma exponencial, até a condição de ponto de murcha permanente. Para tal comportamento, esses autores propuseram a relação descrita pela equação 15:

$$K_s = \frac{Ln(LAT + 1)}{Ln(LAT + 1)} \quad (15)$$

em que Ln é o logaritmo neperiano e LAT a lâmina atual de água disponível no solo para as plantas (mm).

Existem diversas metodologias para determinação do coeficiente de ajuste em razão da aplicação localizada da água (K_L), sumarizadas por Lopez et al. (1997). As mais frequentemente utilizadas são representadas pelas equações 16, 17 e 18:

- Keller (1978)

$$K_L = A_{ms} + 0,15 (1 - A_{ms}) \quad (16)$$

- Fereres (1981)

$$\text{Se } A_{m/s} \geq 0,65 \rightarrow K_L = 1,0 \quad (17a)$$

$$\text{Se } 0,20 < A_{m/s} < 0,65 \rightarrow K_L = 1,09 A_{m/s} + 0,3 \quad (17b)$$

$$\text{Se } A_{m/s} \leq 0,20 \rightarrow K_L = 1,94 A_{m/s} + 0,10 \quad (17c)$$

- Keller e Bliesner (1990)

$$K_L = \sqrt{A_{m/s}} \quad (18)$$

em que $A_{m/s}$ é a fração de área molhada ou sombreada, prevalecendo o maior valor.

Segundo Mantovani et al. (2006), a metodologia proposta por Keller (1978) é mais recomendada para culturas com maior densidade de plantio, como as hortaliças, enquanto a proposta por Fereres (1981) é mais indicada para culturas com maior espaçamento entre plantas, como as fruteiras. Já a equação proposta por Keller e Bliesner (1990), por ser uma relação intermediária às demais, tem sido indicada para uso geral.

Métodos de manejo da água de irrigação

Depois de selecionado e instalado o sistema de irrigação mais apropriado para as condições locais de solo, clima e socioeconômicas, é necessário adotar uma metodologia para o manejo da água de irrigação capaz de indicar, de forma minimamente precisa, quando irrigar e quanto de água aplicar por irrigação.

A utilização de um ou mais indicadores com base na planta, no solo e/ou na atmosfera para indicação de quando e quanto irrigar torna disponível um grande número de métodos de manejo de irrigação. Ademais, cada indicador pode ser avaliado por várias técnicas e equipamentos distintos.

Para responder à questão de quando irrigar, além da escolha do indicador a ser utilizado, deve-se considerar outro aspecto importante relacionado ao fato de o turno de rega poder ser prefixado ou variável. A estratégia desejável é a adoção

de turno de rega variável, porque o solo é um reservatório limitado de água e a demanda de água pelas plantas (ET_c) é variável ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura e em função das variações climáticas.

Entretanto, segundo Bernardo et al. (2005), existem situações em que pode ser necessário prefixar o turno de rega, como, por exemplo, em projetos de irrigação de múltiplos usuários, com características específicas de distribuição de água ou com capacidade limitada de atender a toda a área irrigada. Adicionalmente, segundo Marouelli e Guimarães (2006), o conhecimento antecipado da data das irrigações, predefinindo turnos de rega para cada estágio da cultura, possibilita que as práticas culturais e outras atividades na propriedade possam ser antecipadamente planejadas. Sobretudo para produtores de hortaliças, como batata, pimentão e tomate, é altamente desejável manejar a irrigação a partir de turnos de rega prefixados, visto que as irrigações e os tratos fitossanitários são relativamente frequentes, havendo necessidade de planejar as diversas práticas culturais entre os eventos de irrigação. A questão fitossanitária é crítica na irrigação por aspersão de várias espécies de plantas, cuja água aplicada sobre as folhas pode interferir negativamente no controle químico de pragas e doenças. Outras condições, que requerem a adoção de turno de rega prefixado, ocorrem quando o manejo de água for realizado com base em dados históricos de ET_c e em projetos coletivos de irrigação, onde cada irrigante recebe água em dias previamente estabelecidos.

A prefixação do turno de rega pode trazer maior praticidade na programação das irrigações; porém, pode influenciar negativamente na produtividade e/ou na eficiência de uso da água. Isso porque, quando se adota um turno de rega prefixado, mesmo aplicando-se a lâmina de água necessária para retornar o solo à sua condição de capacidade de campo, as plantas poderão sofrer com a falta de água durante certo período de tempo, principalmente em solos com menor capacidade de retenção de água e em regiões com maior variabilidade climática. Por outro lado, a adoção de um turno de rega muito pequeno pode trazer problemas fitossanitários à cultura e de desenvolvimento superficial das raízes, entre outros.

Para responder à questão de quanto irrigar, dois procedimentos principais devem ser considerados: um a partir da avaliação do teor de água no solo (indicador de solo) e outro, da determinação da ET_c (indicador com base na atmosfera).

Dada a dinâmica da necessidade diária de água das plantas e os inúmeros fatores que a afetam, os métodos mais recomendados para estabelecer a quantidade de água a ser aplicada em lavouras comerciais sensíveis ao estresse hídrico e de alto retorno econômico são, segundo Thompson et al. (2007), aqueles com base na

estimativa da ET_c em tempo real, usando-se o procedimento da FAO (ALLEN et al., 1998), e com base no uso de sensores de umidade ou de tensão de água no solo. A título de ilustração, é apresentada na Tabela 10 a precisão relativa dos principais métodos de manejo da água de irrigação.

A seguir, são apresentados quatro métodos para manejo da água de irrigação que, de alguma forma, englobam a grande maioria daqueles existentes. Para cada método, serão apresentadas suas principais variantes, especialmente aquelas relacionadas ao uso de diferentes indicadores e à adoção de turno de rega variável e prefixado.

Tabela 10. Nível relativo de precisão dos principais métodos de manejo da água de irrigação.

Precisão	Método de manejo
0	Adivinhação (somente experiência do produtor)
1	Tato-aparência
2	Calendário de irrigação (dados históricos de ET_c)
3	Estado da água no solo
4	Estado da água no solo e evapotranspiração
5	Balanço diário de água no solo
6	Balanço diário de água no solo com medição do estado da água no solo para ajustes do balanço

Fonte: adaptado de Simonne et al. (2006).

Método do balanço diário de água no solo

O método do balanço diário de água na zona radicular consiste na realização de um controle diário da ET_c , precipitação pluviométrica, lâmina de irrigação e ascensão capilar da água, além das perdas de água por percolação profunda e escoamento superficial. Existem muitas variações e simplificações desse método, dependendo de como seus parâmetros são avaliados.

Em condições de irrigação controlada, em que as perdas de água por percolação profunda e escoamento superficial são mínimas, e quando o lençol freático é profundo o suficiente para tornar o fluxo capilar ascendente desprezível, as variáveis necessárias à determinação da lâmina de água disponível no solo ficam restritas à ET_c , à precipitação efetiva e à lâmina de irrigação. Assim, considerando-se uma lâmina de água inicialmente disponível no solo (LRD), a determinação diária da

ETc e da precipitação efetiva permite definir tanto o momento de irrigar quanto a lâmina de água a ser aplicada (MANTOVANI et al., 2006; MAROUELLI et al., 1996).

A irrigação deve ser realizada em qualquer momento em que a disponibilidade de água no solo estiver reduzida a um valor mínimo, desde que não prejudique o desempenho da cultura (turno de rega variável), ou seja, quando a relação descrita pela equação 19 for verdadeira.

$$\sum_{i=1}^n (ETC_i - Pe_i) \geq LRD \quad (19)$$

em que n é o número de dias entre duas irrigações consecutivas e Pe a precipitação efetiva (mm dia^{-1}).

A lâmina de água real disponível no solo (LRD) pode ser determinada pelas equações 7 ou 8. A equação 7 é indicada quando se dispõe da curva de retenção de água no solo e utilizando-se dados de tensão crítica recomendada para a cultura (Tabelas 4, 5 ou 6).

Definido o momento de irrigar, a quantidade de água necessária para repor a água utilizada pelas plantas e perdida por evaporação pode ser calculada pelo somatório da diferença entre a ETc e a precipitação efetiva ocorrida desde a última irrigação, conforme descreve a equação 20:

$$LRN = \sum_{i=1}^n (EtC_i - Pe_i) \quad (20)$$

em que LRN é a lâmina de água real necessária à irrigação (mm).

É importante verificar que nas equações 19 e 20 também não foi considerada a lâmina de água interceptada pelo dossel da cultura. De maneira geral, a fração de água retida no dossel é muito pequena em comparação com o total aplicado por irrigação por aspersão. Em situações que requerem irrigações frequentes (uma ou mais irrigações diárias) com a aplicação de pequenas lâminas (<5 mm), tais perdas passam a ser significativas e devem ser consideradas.

O uso do balanço de água no solo requer, no início das irrigações, que o solo esteja na capacidade de campo. Caso contrário, é necessário conhecer, por meio de avaliações de campo, a umidade real do solo antes da primeira irrigação.

O manejo de água pelo método do balanço também pode ser feito a partir de um turno de rega prefixado. Para tal situação, o turno de rega deve ser no máximo igual ao calculado pela equação 21:

$$TR_{\max} = \frac{LRD}{ETc_{hist}} \quad (21)$$

em que TR_{\max} é o turno de rega máximo a ser adotado (dias) e ETc_{hist} a evapotranspiração da cultura com base em série histórica (mm dia⁻¹).

Conforme mencionado anteriormente, é desejável adotar um turno de rega prefixado para cada estágio de desenvolvimento da cultura, uma vez que a disponibilidade de água no solo e a ETc variam com a idade das plantas. Por isso, não é recomendável considerar o turno de rega que atenda ao estágio mais crítico, normalmente determinado para fins de dimensionamento do sistema de irrigação.

O valor de ETc a ser utilizado nas equações 19 e 20 deve ser determinado em tempo real, ou seja, usando-se um método que permita o seu cálculo diário. O método de Penman-Monteith é o mais indicado, pois possibilita estimativas horárias de ETc . Métodos com precisão de cinco dias, como o do tanque Classe A, podem ser usados com o devido cuidado.

Por outro lado, a ETc a ser aplicada na equação 21 (ETc_{hist}) deve ser calculada utilizando-se uma série histórica de dados climáticos disponível para a região. Caso não seja possível utilizar o método de Penman-Monteith, pode-se usar um método com precisão de cinco dias ou dez dias em razão da disponibilidade de dados climáticos.

Quando ocorrem precipitações, nem sempre toda a água fica disponível no solo para atender à demanda evapotranspirativa da cultura. Deve-se considerar apenas a precipitação efetiva, ou seja, a diferença entre a precipitação total e a perda de água por percolação profunda e escoamento superficial. Precipitações abaixo de 5 mm geralmente podem ser desprezadas.

A estimativa da precipitação efetiva para períodos de um dia é geralmente difícil de ser realizada com precisão. Para fins de manejo de irrigação, pode ser estimada de maneira aproximada, segundo Marouelli et al. (1996), com base na precipitação e na lâmina de água necessária para restabelecer a capacidade máxima de armazenamento de água do solo, desde que assumidas algumas condições. Primeiramente, pode-se admitir que a perda de água por escoamento superficial

é desprezível, quando a precipitação é inferior ao deficit atual de água no solo. Isso porque a lâmina de água necessária para que o solo retorne à condição de capacidade de campo é geralmente inferior a 30 mm e chuvas dessa magnitude, comumente, não acarretam escoamento superficial significativo, exceto em solos de baixa permeabilidade, declivosos ou compactados. No caso de chuvas intensas e/ou quando a umidade do solo estiver próxima à capacidade de campo, podem ocorrer tanto escoamento superficial quanto percolação profunda. Para tal situação, pode-se considerar que a precipitação, mesmo que acarrete escoamento superficial, é capaz de restabelecer a umidade do solo, não sendo imperativo quantificar as perdas por escoamento superficial e percolação profunda. Com base nessas suposições, a precipitação efetiva pode ser estimada, segundo Marouelli et al. (1996), pelas equações 22a ou 22b:

$$\text{Se } P_p < LRN_{atual} \rightarrow P_e = P_p \quad (22a)$$

$$\text{Se } P_p \geq LRN_{atual} \rightarrow P_e = LRN_{atual} \quad (22b)$$

em que P_p é a precipitação pluviométrica (mm) e LRN_{atual} a lâmina atual de água necessária para o solo retornar à condição de capacidade de campo (mm).

O valor de LRN_{atual} na equação 22 pode ser determinada pela equação 23:

$$LRN_{atual} = (\theta_{CC} - \theta_a) \times Z_r \times f_{Am} \quad (23)$$

em que θ_a é a umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Uma limitação do método de manejo com base no balanço de água no solo está na precisão da estimativa da ETc , dependente da equação e da fidelidade dos valores de Kc utilizados. Como o valor de Kc é afetado por diversos fatores, mesmo o uso de coeficientes determinados regionalmente pode não ser totalmente preciso. Além disso, erros na estimativa da capacidade de retenção de água do solo e da precipitação efetiva podem ocorrer em diferentes níveis. Para evitar erros cumulativos e inclusive possibilitar ajustes nos valores de Kc a serem utilizados na safra seguinte, recomenda-se realizar avaliações periódicas da disponibilidade de água no solo ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (WRIGHT; STARK, 1990). O teor de água no perfil do solo pode ser avaliado diretamente pelo método gravimétrico ou por sensores de umidade ou de tensão, como o tensiômetro. Nesse caso, tem-se o método do balanço hídrico diário com medição do estado de água no solo para ajustes no balanço e de Kc , o qual, segundo Simonne et al. (2006), é o método mais recomendado (preciso) para manejo da água de irrigação (Tabela 10).

A programação das irrigações usando-se o método do balanço de água no solo pode ser realizada manualmente, por meio de planilhas eletrônicas ou de programas de computador específicos. Albuquerque (2008) e Mantovani et al. (2006) listam vários programas computacionais disponíveis para uso no Brasil.

O grande avanço tecnológico e a redução de custos nas áreas de informática, e estações agrometeorológicas automáticas e transmissão de dados via satélite, rádio ou celular têm permitido, segundo Mantovani et al. (2006), uma expansão da utilização de dados climáticos em tempo real para fins de manejo da água de irrigação. Nesse sentido, existem atualmente no mercado brasileiro empresas especializadas que oferecem serviços e programas de computador para a realização do manejo de água em tempo real pelo método do balanço diário de água no solo. O problema é que, por questões econômicas, algumas dessas empresas somente têm interesse em áreas irrigadas acima de 100 hectares. Todavia, em algumas regiões, já se podem encontrar técnicos autônomos ou pequenas empresas que prestam serviços de “aconselhamento” de irrigação em áreas menores.

Método do estado da água no solo

Conforme mencionado anteriormente, as irrigações devem ser realizadas em qualquer momento cuja umidade do solo ou tensão de água no solo atingir um valor a partir do qual a produtividade da cultura começa a ser afetada negativamente. Para irrigar no momento certo, é necessário o monitoramento contínuo, no local de cultivo, do teor ou da tensão de água no solo. Isso pode ser feito por meio de sensores que medem diretamente a tensão de água, como o tensiômetro e o Irrigas[®], ou a umidade do solo, como sensores do tipo capacitivo e TDR, ou ainda por meio de amostragem de solo, como o método gravimétrico. O método do tato-aparência, apesar do empirismo, possibilita uma avaliação qualitativa da fração de água disponível no solo e, portanto, pode ser incluído no grupo de métodos aqui denominado método do estado da água no solo.

A decisão sobre quando irrigar deve ser feita com base em avaliações da tensão, umidade ou disponibilidade de água no solo entre 40% e 50% da profundidade efetiva do sistema radicular. Leituras discrepantes, em virtude de problemas de local de instalação, amostragem ou funcionamento do sensor, não devem ser consideradas no cálculo da média das leituras.

O momento de irrigar geralmente é estabelecido em razão da tensão crítica de água no solo para a cultura de interesse, como indicado nas Tabelas 4, 5 e 6.

A umidade crítica do solo para fins de irrigação (θ_{Uic}) deve ser determinada com base na tensão crítica de água no solo, caso se disponha da curva de retenção de água no solo. Sem a curva de retenção, a umidade crítica pode ser determinada pela equação 14 em razão da capacidade de campo, do ponto de murcha permanente e do fator de reposição de água ao solo recomendado para a cultura (Tabela 7).

Determinado o momento de irrigar, a quantidade de água a ser repostada ao solo pode ser calculada utilizando-se a equação 24:

$$LRN = (\theta_{CC} - \theta_{UI}) \times Z_r \times f_{Am} \quad (24)$$

em que θ_{UI} é a umidade do solo no momento de irrigar ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Conforme já discutido, a umidade do solo no momento de irrigar (θ_{UI}) não deve ultrapassar a umidade crítica para a cultura relativamente ao solo em questão (θ_{Uic}). Isso é uma das condições básicas para maximizar a produtividade da cultura e, ao mesmo tempo, otimizar a eficiência do uso de água pelas plantas.

Quando sensores de tensão são utilizados para indicar o momento de irrigar, é desejável dispor da curva de retenção para a determinação da lâmina de irrigação. Marouelli (2008) e Marouelli e Calbo (2009) apresentaram procedimento interativo para o ajuste da lâmina de irrigação quando não se dispõe da curva de retenção. Para uso de tal procedimento interativo, na Tabela 11

Tabela 11. Sugestão de lâmina de água real necessária por irrigação, em milímetros de água por centímetro de solo, conforme a tensão de água no solo.

Tensão (kPa)	Textura do solo ⁽¹⁾		
	Grossa	Média	Fina
15	0,20	0,36	0,50
20	0,23	0,42	0,60
30	0,28	0,54	0,80
40	0,33	0,66	0,90
50	0,35	0,72	1,00
70	0,38	0,78	1,10

⁽¹⁾ Textura grossa inclui solos de classe textural areia, areia franca e franco arenoso; textura média, solos de classe textural franco, franco siltoso, franco argilo-arenoso e silte; textura fina, solos de classe textural franco argilo-siltoso, franco argiloso, argila arenosa, argila siltosa, argila e muito argiloso.

Obs.: solos de cerrado de textura fina, por apresentarem partículas fortemente agregadas, devem ser considerados, para fins de uso desta tabela, como de textura média.

Fonte: Marouelli (2008).

é apresentada a sugestão de lâmina de água real necessária por irrigação, conforme a tensão de água no solo no momento da irrigação.

O manejo de água por meio do método do estado da água no solo permite um controle da irrigação em tempo real, especialmente quando são utilizados sensores que permanecem instalados no campo. Todavia, para o bom funcionamento, os sensores devem ser previamente calibrados e/ou vistoriados e corretamente instalados. Sensores como o tensiômetro, por exemplo, necessitam de manutenção constante durante todo o tempo de uso. Informações detalhadas sobre procedimentos e cuidados durante o preparo, instalação e uso de tensiômetros e sensores do tipo Irrigas® podem ser encontrados, respectivamente, em Marouelli (2008) e Marouelli e Calbo (2009).

Caso o indicador tato-aparência seja adotado como estratégia de manejo, a interpretação qualitativa da disponibilidade de água no solo é feita usando-se a Tabela 2, conforme indicado anteriormente. A porcentagem de água disponível considerada como crítica para indicar o momento de irrigar uma cultura pode ser determinada utilizando-se a equação 25:

$$AD_c = 100 (1 - f_r) \quad (25)$$

em que AD_c é a disponibilidade crítica de água no solo (%).

A lâmina de água a ser aplicada por irrigação, quando se utiliza o indicador tato-aparência, pode ser estimada utilizando-se a Tabela 12 em razão das faixas de disponibilidade atual de água no solo indicadas na Tabela 2. Vale destacar nova-

Tabela 12. Sugestão de lâmina de água real necessária por irrigação, em milímetros de água por centímetro de solo, conforme a disponibilidade atual de água no solo (AD), considerando-se as faixas de AD da Tabela 2.

AD (%)	Textura do solo ⁽¹⁾		
	Grossa	Média	Fina
0–25	0,45	1,05	1,75
25–50	0,30	0,75	1,25
50–75	0,20	0,45	0,75
75–100	0,05	0,15	0,25

⁽¹⁾ Textura grossa inclui solos de classe textural areia, areia franca e franco arenoso; textura média, solos de classe textural franco, franco siltoso, franco argilo-arenoso e silte; textura fina, solos de classe textural franco argilo-siltoso, franco argiloso, argila arenosa, argila siltosa, argila e muito argiloso.

Obs.: solos de cerrado de textura fina, por apresentarem partículas fortemente agregadas, devem ser considerados, para fins de uso desta tabela, como de textura média.

mente que o manejo com base no critério do tato-aparência é pouco preciso, mas muitas vezes possibilita um melhor controle das irrigações para produtores que não utilizam nenhum critério, desde que a amostragem do solo para avaliação da umidade seja feita nos locais corretos.

Método combinado do estado da água no solo e da evapotranspiração

O método do estado da água no solo e da evapotranspiração da cultura consiste na combinação de parte dos dois métodos anteriores. O momento de irrigar é determinado a partir de um indicador de umidade ou tensão de água no solo e a quantidade de água a ser aplicada é calculada com base na *ETc*.

É mais trabalhoso e dispendioso que os dois métodos anteriores, pois requer o monitoramento em tempo real (diário) de indicadores de solo e atmosfera. No entanto, o método pode ser útil, principalmente em cultivos irrigados por sistemas localizados. Na irrigação localizada, a determinação da lâmina de irrigação, a partir de medições da umidade do solo, é mais complexa e sujeita a erros em virtude do fato de que somente parte do perfil do solo é molhada. Além disso, na irrigação localizada é necessário uma série de ajustes nos valores de *Kc*, o que aumenta o erro associado à determinação de *ETc*. Assim, o uso combinado desses dois indicadores possibilita minimizar os erros associados na determinação do momento de irrigar e, principalmente, da lâmina de irrigação. Possibilita ainda realizar ajustes nos valores de *Kc* utilizados.

A título de exemplo, a quantidade de água aplicada deve ser considerada insuficiente quando a tensão ou umidade média, indicada por sensores instalados a 40–50% da profundidade efetiva das raízes e avaliada antes da irrigação, for sistematicamente maior que a tensão crítica de água no solo ou umidade crítica recomendada para a cultura. Nesse caso, sugere-se fazer um ligeiro aumento (5% a 10%) nos valores de *Kc* e, assim, aumentar a lâmina de água nas irrigações subsequentes. Por outro lado, as irrigações serão excessivas quando a tensão ou umidade média, indicada por sensores instalados a cerca de 100% da profundidade efetiva, atingir respectivamente valores inferiores a 15–20 kPa ou próximos à capacidade de campo, devendo-se então reduzir o valor de *Kc* utilizado. Segundo Marouelli et al. (1996), tal procedimento permitirá que os valores de *Kc* sejam ajustados, de uma safra para a outra, de forma a melhor representar as condições particulares do cultivo em questão.

Método do calendário de irrigação

O método do calendário de irrigação consiste no manejo da água de irrigação por meio da adoção de turnos de rega prefixados, seja para cada estágio de desenvolvimento da cultura, seja para todo o ciclo de desenvolvimento da cultura, e do preestabelecimento das lâminas de água a serem aplicadas com base em dados históricos de ET_c .

Esse método somente é recomendado quando não se dispõe de equipamentos que permitam o emprego de um método mais preciso como os anteriormente citados. A baixa precisão desse método decorre de as condições do ambiente, principalmente meteorológicas, serem bastante dinâmicas, e do fato de a necessidade de água para as plantas ocorrer em resposta a um conjunto de fatores que interagem entre si.

Em regiões áridas e semiáridas, ou que apresentam estações secas definidas (cerado), a programação antecipada das irrigações pode ser feita com razoável grau de acerto. Nessas condições, a variabilidade da evapotranspiração de ano para ano é geralmente inferior a 25% (HANSON, 1996), o que torna possível prever antecipadamente datas e lâminas de irrigação para combinações específicas de solo, clima, cultura e época de plantio para lavouras menos sensíveis ao estresse hídrico e de baixo a moderado retorno econômico (MAROUELLI, 2000).

O turno de rega a ser prefixado para cada estágio de desenvolvimento da cultura pode ser determinado pela equação 21 a partir de dados históricos de ET_c e de armazenamento de água pelo solo. Como muitas vezes a ET_c histórica calculada refere-se à ET_c média, seu valor pode, a cada dois anos, ser superado em 1, em teoria. Assim, por segurança, é mais prudente prefixar um menor valor de turno de rega, em torno de 25% menor, que o calculado pela equação 21.

A lâmina de água necessária a ser aplicada por irrigação é obtida multiplicando-se o turno de rega pela evapotranspiração, conforme a equação 26:

$$LRN = TR \times ET_{c_{hist}} \quad (26)$$

em que TR é o turno de rega (dias).

O valor da $ET_{c_{hist}}$ deve ser determinado com base em uma série histórica de ET_o disponível para a região ou de dados climáticos que possibilitem sua determinação. Dispondo dos dados necessários, sugere-se utilizar o método de

Penman-Monteith. Outras opções são os métodos do tanque Classe A, Blaney-Criddle-FAO, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley-Taylor e Radiação-FAO.

Por serem o turno de rega e a *LRN* calculados previamente, a partir da *ETc* média mensal histórica, igualmente distribuída durante o mês em consideração, a irrigação pode ser deficiente ou em excesso uma vez que não se consideram as variações da demanda evaporativa da atmosfera ao longo do tempo. Assim, ambos os valores não devem ser tomados como fixos, mas como aproximações ou guias de irrigação. Nesse sentido, Marouelli et al. (2008c) apresentaram procedimentos visando a adequar a *LRN* em decorrência de variações climáticas bruscas e prorrogar a data da irrigação em decorrência de chuvas.

Visando a auxiliar os produtores de hortaliças com menor experiência e que não adotam critérios e/ou equipamentos para manejar a irrigação de forma consistente, Marouelli et al. (2008c) desenvolveram tabelas que permitem programar antecipadamente as datas e lâminas de irrigação para diferentes hortaliças irrigadas por aspersão, a partir de dados históricos de temperatura e umidade relativa média do ar, tipo de solo e profundidade efetiva do sistema radicular.

Manejo de irrigação com água salina

A concentração de sais dissolvidos na água de irrigação não é, em muitas situações, suficiente para prejudicar a produção de muitas culturas. Os danos são em razão, quase sempre, dos sais que vão acumulando-se no solo e salinizando-o gradativamente. O problema é mais frequente em regiões áridas e semiáridas, onde é comum a presença de sais solúveis na água e/ou no solo e a evapotranspiração é maior que a precipitação pluviométrica, o que provoca o acúmulo de sais no solo. Para cultivo em ambiente protegido, onde a chuva não molha a área e o uso do solo é intensivo, até mesmo com a aplicação intensa de adubações, a salinização também pode ocorrer.

Problemas de salinização em áreas irrigadas, em regiões áridas e semiáridas, ocorrem em consequência da elevação do lençol freático por causa da deficiência de drenagem natural ou artificial. Ao se elevar, o lençol freático traz consigo sais que irão se acumular na zona radicular e na superfície do solo. Nessas situações, o primeiro problema a ser resolvido é o rebaixamento do lençol freático por meio da implantação de um sistema de drenagem artificial. Segundo Ayers e Westcot (1991), a profundidade em que o lençol freático deve ser estabilizado é geralmente superior a 2 m.

A salinização do solo atenua a disponibilidade de água para as plantas em vista do aumento do valor absoluto do potencial osmótico do solo e, conseqüentemente, do potencial total. Além disso, alguns sais causam problemas de toxidez às plantas. Sendo o processo da osmose dependente da concentração de sais, o potencial osmótico da água do solo, segundo Richards (1954), pode ser estimado, aproximadamente, utilizando-se a equação 27:

$$P_o = -36 C E e \quad (27)$$

em que P_o é o potencial osmótico do extrato do solo (kPa) e $C E e$ é a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo a 25 °C (dS m⁻¹).

Para contrabalançar a redução no potencial total, deve-se manter o solo mais úmido que o normal por meio de irrigações mais frequentes. Tal estratégia de manejo facilitará a absorção de água pelas plantas, pois quanto maior o teor de água no solo, menores serão a tensão osmótica e a tensão matricial, principais componentes da tensão total da água no solo.

A aplicação de uma lâmina de água adicional de lixiviação é outra estratégia que deve ser adotada quando se utiliza água salina. A água de lixiviação reduz o acúmulo de sais na zona radicular, minimizando os efeitos do potencial osmótico. A estratégia é aplicar uma lâmina de água maior que a lâmina real necessária (LRN), e que seja suficiente para lixiviar o excesso de sais para além da zona radicular.

As perdas de água por percolação profunda, que normalmente estão associadas à ineficiência dos sistemas de irrigação, são úteis em áreas com problemas de salinidade. Segundo Ayers e Westcot (1991), tais perdas são muitas vezes suficientes para manter o balanço de sais no solo em nível adequado.

A fração de água em excesso para lixiviação dos sais é normalmente determinada a partir da salinidade da água de irrigação e do nível crítico de tolerância da cultura. Para irrigação por aspersão e por sulco, o cálculo da lixiviação mínima requerida pode ser determinado pela equação 28 (AYERS; WESTCOT, 1991; KELLER; BLIESNER, 1990):

$$LR = \frac{CEa}{5 \times CEe_{crit} - CEa} \quad (28)$$

em que LR é a fração de lixiviação mínima requerida (decimal), CEa a condutividade elétrica da água de irrigação (dS m⁻¹) e CEe_{crit} a condutividade elétrica crítica do extrato de saturação do solo (dS m⁻¹).

Para irrigação por gotejamento e microaspersão, com alta frequência de aplicação de água, a fração de lixiviação pode ser calculada pela média das equações 29 e 30, apresentadas por Keller e Bliesner (1990) e Smith e Hancock (1986), respectivamente:

$$LR = \frac{CEa}{2 \times CEE_{100\%}} \quad (29)$$

em que $CEE_{100\%}$ é a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo para a qual a produtividade é reduzida em 100% (dS m^{-1}).

$$CEE_{crit} = \frac{0,5 CEa}{1 - LR} \times \ln\left(\frac{1}{LR}\right) \quad (30)$$

O valor de CEE_{crit} pode ser determinado na Tabela 13 em razão da porcentagem de redução de produtividade que se pode tolerar. Nota-se que, quanto menor a perda de produtividade tolerada, maior a fração de lixiviação. Em geral, calcula-se o valor de LR permitindo-se uma redução de produtividade de 10%. Para condições extremas, ou seja, água muito salina e disponibilidade limitada de água, deve-se considerar uma redução maior. O valor de $CEE_{100\%}$ também é fornecido na Tabela 13 para diferentes culturas.

Entre outras estratégias para prevenir ou minimizar problemas de salinidade, estão a adoção de práticas que aumentem a infiltração e a percolação e que reduzam a evaporação de água do solo, o uso de sistemas por gotejamento e sulco, em detrimento da aspersão, e a seleção de cultivares mais adaptadas aos níveis de salinidade existentes.

Maiores informações sobre qualidade da água e estratégias de controle de salinidade em áreas irrigadas podem ser obtidas em Ayers e Westcot (1991), Gueyi et al. (2004), Hoffman e Shalhevet (2007) e Rhoades e Loveday (1990).

Aumento da eficiência do uso de água pelas plantas

A eficiência do uso de água pelas plantas é normalmente definida como sendo a produção comercial por unidade de água efetivamente utilizada pela cultura na forma de evapotranspiração (JENSEN, 2007). Assim, todas as estratégias e práticas de cultivo capazes de aumentar a produtividade da cultura e/ou reduzir a ETc

Tabela 13. Valores críticos de condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (dS m^{-1}) conforme a porcentagem de redução esperada de produtividade.

Cultura	Redução relativa de produtividade (%)				
	0	10	25	50	100
Abacate	1,3	1,8	2,5	3,7	6,0
Abóbora	2,5	3,3	4,4	6,3	10,0
Aipo	1,8	3,4	5,8	9,9	18,0
Alface	1,3	2,1	3,2	5,1	9,0
Alho	1,7	2,7	4,2	6,7	11,7
Banana	1,1	2,3	4,2	7,2	13,3
Batata	1,7	2,5	3,8	5,9	10,0
Batata-doce	1,5	2,4	3,8	6,0	11,0
Beterraba	4,0	5,1	6,8	9,6	15,0
Brócolis	2,8	3,9	5,5	8,2	14,0
Cebola	1,2	1,8	2,8	4,3	7,4
Cenoura	1,0	1,7	2,8	4,6	8,1
Citros	1,7	2,3	3,3	4,8	8,0
Espinafre	2,0	3,3	5,3	8,6	15,0
Feijão-vagem	1,0	1,5	2,3	3,6	6,3
Goiaba	4,7	5,7	7,3	9,8	14,9
Laranja	1,3	2,1	3,2	5,1	8,9
Limão	1,5	2,3	3,5	5,4	9,3
Melancia	2,2	3,6	5,7	9,1	16,0
Melão	2,2	3,6	5,7	9,1	16,0
Morango	1,0	1,3	1,8	2,5	4,0
Nabo	0,9	2,0	3,7	6,5	12,0
Pepino	2,5	3,3	4,4	6,3	10,0
Pimentão	1,5	2,2	3,3	5,1	8,6
Rabanete	1,2	2,0	3,1	5,0	8,9
Repolho	1,8	2,8	4,4	7,0	12,0
Tomate	2,5	3,5	5,0	7,6	13,0
Uva	1,5	2,5	4,1	6,7	12,0

Fonte: Ayers e Westcot (1991) e Hoffman e Shalhevet (2007).

podem ser utilizadas para aumentar a eficiência do uso de água pelas plantas.

O aumento de produtividade pode ser atingido, por exemplo, com a simples escolha de uma cultivar mais produtiva ou adaptada às condições locais de cultivo, além da melhoria das práticas de cultivo, como a adequação do espaçamento entre plantas, da adubação, da irrigação e dos tratos fitossanitários.

Já a diminuição da ET_c pode ser alcançada reduzindo-se a evaporação das superfícies molhadas (do solo e da planta) e a transpiração. A redução da evaporação de água do dossel vegetal pode ser feita aumentando-se o intervalo entre irrigações ou substituindo-se o sistema de aspersão por outro que não molhe a parte aérea das plantas.

A redução das perdas de água por evaporação pode ser obtida de diferentes formas, com destaque para a adoção de sistemas de irrigação localizada ou subsuperficial, o uso de palhada ou plástico para a cobertura da superfície do solo, e o aumento do intervalo entre irrigações. Nos dois primeiros casos, podem-se reduzir as perdas de água por evaporação da ordem de 50% a 80%, o que representa uma redução entre 10% e 30% da ET_c (ALLEN et al., 1998).

Por irrigar de forma localizada, sem molhar toda a superfície do solo, os sistemas de gotejamento e microaspersão minimizam as perdas de água por evaporação, que podem diminuir em até 80%, durante o estágio inicial da cultura (MANTOVANI et al., 2006). No caso de fruteiras jovens, a redução pode ser ainda maior. Para algumas culturas, segundo Lamont Junior et al. (2007), a conversão de sistemas por aspersão para gotejamento pode reduzir o uso global de água em até 50%. De modo geral, a redução da ET_c somente em razão da redução de perdas associadas à evaporação varia entre 20% e 40%. Comparativamente ao gotejamento superficial, a economia de água no gotejamento subterrâneo é da ordem de 10% a 15% basicamente em virtude da menor evaporação (ALLEN et al., 1998; CAMP, 1998; SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI et al., 2002).

Conforme mencionado, algumas práticas de cultivo, como a cobertura do solo com plástico e palhada e o sistema de plantio direto na palhada, também podem contribuir para reduzir as perdas de água por evaporação. Assim, tais práticas têm efeito direto sobre os valores de K_c , principalmente durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura.

A cobertura do solo com filme plástico não transparente, geralmente polietileno preto, é uma prática que vem sendo utilizada na produção agrícola, principalmente de hortaliças, sendo geralmente associada à irrigação por gotejamento.

O plástico é colocado sobre a superfície do solo, ao longo da fileira de plantas, que são transplantadas em pequenos furos no plástico. Dependendo da fração de cobertura do solo, o uso de plástico pode reduzir a evaporação de água entre 50% e 80% (ALLEN et al., 1998). Assim, segundo Allen et al. (2007), os valores de K_c em áreas cobertas com plástico decrescem em média 30% durante o estágio vegetativo e 10% durante o estágio de produção, sendo os valores de $K_{c_{ini}}$ geralmente da ordem de 0,10.

Entre as muitas vantagens que oferece o sistema de plantio direto na palhada ou a simples cobertura do solo com palha está a significativa redução da quantidade de água utilizada para a irrigação das culturas. A maior conservação de água deve-se, majoritariamente, à palhada sobre a superfície do solo, que reduz a evaporação. A economia de água é maior durante os estádios iniciais de desenvolvimento das plantas, principalmente em culturas com menor capacidade de cobertura do solo (STONE; MOREIRA, 2000). Segundo Allen et al. (1998), para uma condição com 50% de cobertura do solo pela palhada, os valores de K_c durante o estágio inicial ($K_{c_{ini}}$) podem ser reduzidos em 25% e, durante o estágio de produção ($K_{c_{pro}}$), entre 5% e 10%. Marouelli et al. (2008b, 2009) verificaram redução entre 10% e 25% do consumo de água de irrigação em sistema de plantio direto de hortaliças.

A redução da transpiração da cultura pode ser alcançada por meio de estratégias que aumentem a resistência estomática ou aerodinâmica das plantas, muitas vezes sem o comprometimento da produção. A resistência estomática pode ser aumentada, por exemplo, com a aplicação de deficit hídrico controlado e o uso de práticas de sombreamento ou molhamento parcial do sistema radicular. O uso de quebra-vento e o cultivo em ambiente protegido promovem a redução da circulação de ar no ambiente cultivado.

Vários estudos têm sido realizados na área de regulação do deficit hídrico (COELHO FILHO et al., 2006; DOMINGO et al., 1996; GONZÁLEZ-ALTOZANO; CASTEL, 2000), que consiste na aplicação de deficit controlado durante estádios ou períodos específicos da cultura. Além de definir períodos menos sensíveis, essa técnica permite determinar intensidades de deficit hídrico que tenham pequeno efeito sobre a produtividade e a qualidade da produção. Nos demais períodos, as irrigações devem ser realizadas sem deficit. Assim, pode-se alcançar redução significativa do volume de água aplicada, com insignificantes prejuízos à produção.

Tem-se observado que a produtividade e a qualidade de frutos em fruteiras arbóreas são muito afetadas pelo manejo de água durante os períodos de floração, pegamento e crescimento de frutos. Dependendo da magnitude do deficit hídri-

co a que as plantas são submetidas, os níveis de abscisão de flores e frutos e o tamanho de fruto podem ser consideravelmente afetados (DOMINGO et al., 1996). Para tangerina e limão 'Tahiti', Coelho Filho et al. (2006) e González-Altozano e Castel (2000) verificaram, repetitivamente, que o uso da estratégia de regulação do deficit é mais apropriado durante o período de crescimento de fruto e que o período mais crítico à ocorrência de deficit hídrico é durante a floração e formação inicial de fruto.

Embora as hortaliças sejam, em geral, sensíveis à deficiência de água no solo, o manejo com regulação do deficit hídrico em estádios de desenvolvimento específicos não prejudica a produção de algumas espécies. Existem casos em que o manejo com deficit hídrico é decisivo para a obtenção de produtividades mais elevadas e produtos de melhor qualidade.

Nas condições de cerrado do Brasil Central, Marouelli et al. (1991a) verificaram incremento de 20% na produtividade de ervilha-seca, além de melhor qualidade de grãos, quando as irrigações durante os estádios vegetativo e de produção foram realizadas somente quando a tensão de água no solo atingiu 200 kPa, comparativamente à condição sem deficit hídrico (25 kPa). Segundo os autores, sob irrigação sem deficit hídrico, as plantas vegetaram de forma luxuriante, em detrimento da produção de grãos, além de ficarem mais sujeitas a doenças. Para lentilha, Saraf e Baitha (1985) também verificaram resultados semelhantes, com indicativo de tensão crítica entre 200 kPa e 400 kPa.

No caso do cultivo do tomateiro industrial sob irrigação por aspersão, Marouelli et al. (1991b) verificaram não ter ocorrido redução significativa de produtividade para irrigações realizadas durante os estádios vegetativo e de maturação, considerando-se a tensão de água no solo de até 460 kPa. Durante o estágio de produção, maior produtividade foi obtida para a condição sem deficit hídrico (30 kPa). Quanto à qualidade, plantas submetidas a deficit hídrico durante o estágio de maturação apresentaram frutos com maior teor de sólidos solúveis totais. O menor desenvolvimento das plantas submetidas a deficit hídrico durante o estágio vegetativo foi compensado por uma menor incidência de doenças foliares. O maior intervalo entre irrigações durante o estágio de maturação também possibilitou menor incidência de doenças foliares e apodrecimento de frutos.

Na técnica de molhamento parcial do sistema radicular, desenvolvida na Austrália para fruteiras (LOVEYS et al., 2000), a irrigação é aplicada em regime de alta frequência durante um determinado período de tempo, de cada lado das fileiras de plantas. O secamento do solo induz parte das raízes a produzir ácido abscísico, que é levado às folhas provocando a redução da abertura estomática e, conse-

quentemente, a redução da taxa de transpiração, sem que a planta manifeste sintomas acentuados de estresse. Tal estratégia tem sido avaliada em diversos estudos (GU et al., 2000; KANG et al., 2002; SOUZA et al., 2004; STOLL et al., 2000), que indicam relevante redução da ET_c , com aumento de até 80% na eficiência de uso de água e pequena redução de produtividade.

Estudo realizado por Coelho et al. (2009) com limão 'Tahiti', na região norte de Minas Gerais, indicou não haver redução significativa da produtividade de limão, quando aplicada a técnica de molhamento parcial do sistema radicular, com 50% de redução da lâmina de irrigação e alternância de 7, 14 e 21 dias do lado molhado da fileira de plantas, comparada ao manejo convencional de água sem deficit (Figura 10). Resultados semelhantes também foram observados por Daniel et al. (2009), na região semiárida do Vale do Paraguaçu, Bahia, para mangueira, cultivar Kent. Os resultados para as culturas do limão e da manga, nas condições brasileiras, estão de acordo com resultados apresentados na literatura internacional e indicam que o molhamento parcial do sistema radicular, com alternância dos lados de até 21 dias e aplicação de 50% da ET_c , resulta em pequena redução de produtividade, comparado à condição totalmente irrigada.

De grande importância para reduzir o desperdício de água na agricultura irrigada e, portanto, aumentar a eficiência global do uso de água na irrigação, são os cui-

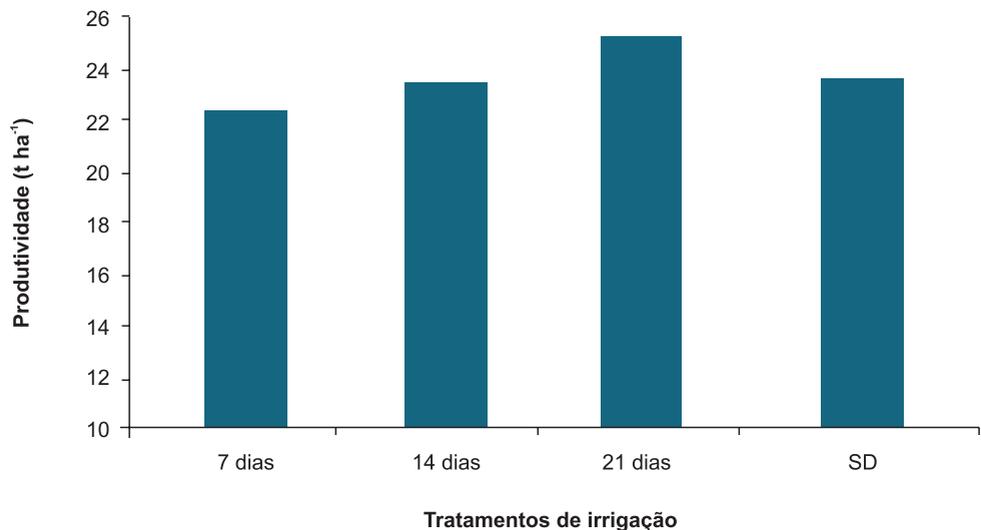


Figura 10. Variação não significativa ($p > 0,05$) de produtividade de limão 'Tahiti' irrigado com a técnica de molhamento parcial do sistema radicular, com alternância do lado molhado das plantas aos 7, 14 e 21 dias e redução de 50% na lâmina de irrigação, comparativamente ao sistema tradicional de irrigação sem deficit hídrico (SD), na região norte de Minas Gerais.

Fonte: Coelho et al. (2009).

dados na manutenção e avaliação periódica dos sistemas de irrigação, de forma que não apresentem problemas de vazamentos e apliquem água o mais uniformemente possível (MANTOVANI et al., 2006). A implantação de um programa de manutenção preventiva e corretiva é fundamental para que o sistema se mantenha em condições de funcionamento adequado. O entupimento de emissores é, sem dúvida, o principal problema a ser considerado num programa de manutenção do sistema de irrigação por gotejamento.

Tempo de irrigação

O tempo de irrigação para que seja aplicada a lâmina de água necessária em sistemas de irrigação por aspersão e localizada (gotejamento e microaspersão) depende da capacidade e eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação. Para sistema por sulco, o tempo de irrigação depende basicamente da capacidade de infiltração de água no solo e do comprimento do sulco. Havendo risco de salinização do solo, o tempo de irrigação também deve ser suficiente para a aplicação da fração de lixiviação.

Irrigação por aspersão

Antes de calcular o tempo de irrigação, é necessário corrigir o valor inicialmente calculado da lâmina de água real necessária (*LRN*), de forma a contemplar a desuniformidade na aplicação de água do sistema de irrigação e, quando necessário, a fração de lixiviação de sais. A lâmina total de água a ser aplicada por irrigação é determinada pela equação 31:

$$LTN = \frac{LRN}{Ea \times (1 - LR)} \quad (31)$$

em que *LTN* é a lâmina total de água a ser aplicada por irrigação (mm) e *Ea* a eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (decimal).

Quando a fração de lixiviação calculada for menor que 10%, as perdas de água por percolação associadas à ineficiência dos sistemas de irrigação são comumente suficientes para proporcionar a lixiviação dos sais. Nesse caso, a *LR* pode ser assumida como 0 e não ser levada em consideração no cálculo da lâmina total de água a ser aplicada.

Na irrigação por aspersão, a eficiência de aplicação de água é determinada pela equação 32 em razão da uniformidade de distribuição de água e das perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento:

$$Ea = CUC \times (1 - P_{e/v}) \quad (32)$$

em que *CUC* é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (decimal) e $P_{e/v}$ a perda combinada de água por evaporação e arrastamento pelo vento (decimal).

As perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento na aspersão podem ser estimadas em razão da velocidade do vento, da *ET_o* e do tamanho de gotas, utilizando-se a Tabela 14.

Tabela 14. Fração de perdas combinadas de água por evaporação e arrastamento pelo vento na irrigação por aspersão, conforme o nível de fragmentação das gotas de água, velocidade do vento e evapotranspiração de referência.

ET _o (mm dia ⁻¹)	Gotas pouco fragmentadas			Gotas muito fragmentadas		
	1 m s ⁻¹	3 m s ⁻¹	5 m s ⁻¹	1 m s ⁻¹	3 m s ⁻¹	5 m s ⁻¹
2	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08
4	0,02	0,03	0,04	0,05	0,08	0,10
6	0,02	0,03	0,04	0,06	0,09	0,12
8	0,02	0,04	0,05	0,07	0,11	0,14
10	0,03	0,04	0,05	0,08	0,13	0,16
12	0,03	0,05	0,06	0,09	0,14	0,18

Fonte: adaptado de Bernardo et al. (2005).

Valores típicos de eficiência de aplicação, para sistemas de irrigação por aspersão com dimensionamento e programa de manutenção minimamente aceitáveis, variam de 65% a 80% para sistemas convencionais, de 60% a 75% para autoprope-lido, e de 75% a 90% para pivô central. Na prática, é comum encontrar sistemas operando com eficiência muito abaixo do aceitável. Assim, a avaliação da eficiência de aplicação deve ser realizada, no mínimo, a cada dois anos, de forma a corrigir problemas que prejudicam o desempenho do sistema.

Nos sistemas convencionais, o tempo de irrigação necessário para aplicar a lâmi-na total de irrigação é determinado utilizando-se a equação 33:

$$T_i = \frac{LTN}{I_a} \quad (33)$$

em que T_i é o tempo de irrigação (h) e I_a é a intensidade de aplicação de água do sistema (mm h^{-1}).

Para pivô central e autopropelido, deve ser selecionada a velocidade de deslocamento necessária para que o sistema aplique uma lâmina igual ou ligeiramente superior à LTN . Para isso, deve-se usar a tabela de intensidades de aplicação versus velocidade de deslocamento do equipamento, fornecida pelo fabricante, ou dados resultantes da avaliação de campo de vazão e de uniformidade de aplicação de água do sistema.

Irrigação localizada

Na irrigação localizada, mesmo quando manejada de forma adequada, ocorrem perdas não controláveis de água por percolação profunda (P_{pp}), especialmente quando as irrigações são realizadas em regime de alta frequência. Dependendo da fração de lixiviação calculada, essas perdas incontrolláveis podem ser suficientes para proporcionar a lixiviação dos sais. Segundo Bernardo et al. (2005), a lâmina total de água a ser aplicada pode ser calculada considerando-se as situações descritas pelas equações 34 e 35:

Se $LR < 0,10$ ou $P_{pp} \geq LR$

$$LTN = \frac{LRN}{Eu \times (1 - P_{pp})} \quad (34)$$

Se $LR \geq 0,10$ ou $P_{pp} < LR$

$$LTN = \frac{LRN}{Eu \times (1 - LR)} \quad (35)$$

A uniformidade de emissão é calculada utilizando-se a equação 36:

$$Eu = \frac{\bar{q}_{25\%}}{\bar{q}_{100\%}} \quad (36)$$

em que $\bar{q}_{25\%}$ é a média das 25% menores vazões medidas e $\bar{q}_{100\%}$ a média das vazões de todos os injetores.

As perdas de água por percolação profunda não controlável são função, principalmente, do tipo de solo e profundidade do sistema radicular da cultura, podendo ser estimadas utilizando-se valores apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Fração de perdas de água por percolação profunda não controlável na irrigação localizada, quando realizada em regime de alta frequência, conforme a textura do solo e a profundidade do sistema radicular da cultura.

Profundidade de raízes (m)	Muito grossa	Grossa	Média	Fina
< 0,8	0,10	0,10	0,05	0,00
0,8–1,5	0,10	0,05	0,00	0,00
> 1,5	0,05	0,00	0,00	0,00

Fonte: Bernardo et al. (2005).

Valores típicos de uniformidade de emissão para sistemas por gotejamento variam entre 65% e 90% e, para microaspersão, entre 65% e 85%. Todavia, é comum observarem-se em campo sistemas com uniformidade abaixo de 50% em virtude de problemas de dimensionamento inadequado, equipamento de baixa qualidade, falta de manutenção e, principalmente, entupimento.

Utilizando-se a equação 37, pode-se calcular o tempo de irrigação para aplicar a *LTN* em sistemas localizados:

$$T_i = \frac{LTN \times E_l \times E_e}{Q_e} \quad (37)$$

em que E_l é o espaçamento entre linhas de emissores (m), E_e o espaçamento entre emissores (m) e Q_e a vazão do emissor ($L \text{ h}^{-1}$).

Na irrigação de fruteiras, é comum usar mais de um emissor por planta, principalmente gotejador. Nesse caso, para utilizar a equação 37, deve-se considerar E_e como sendo igual ao espaçamento entre plantas ao longo da fileira e V_e como o somatório das vazões de todos os emissores colocados por planta.

O volume de água a ser aplicado por planta para atender à demanda de irrigação é calculado pela equação 38:

$$V_{pl} = LTN \times S_p \times S_{LP} \quad (38)$$

em que V_{pl} é o volume de água a ser aplicado por planta a cada irrigação (L), S_p o espaçamento entre plantas (m) e S_{LP} o espaçamento entre linhas de plantas (m).

Irrigação por sulco

Para irrigação por sulco, o tempo de irrigação deve ser igual ao tempo de avanço para a água chegar ao final do sulco mais o tempo de oportunidade necessário para aplicar a lâmina total de água (*LTN*). O comprimento do sulco e a velocidade de infiltração de água dependem do tipo de solo, devendo ser avaliados em testes de campo (BERNARDO et al., 2005). Nesse caso, a *LTN* a ser aplicada no final do sulco é determinada adotando-se a equação 39:

$$LTN = \frac{LRN}{1 - LR} \quad (39)$$

Da mesma forma que mencionado para irrigação por aspersão, deve-se considerar *LR* igual a 0 quando o valor calculado de *LR* for menor que 0,10 (sem risco de salinização).

Horário de irrigar

De modo geral, o horário da irrigação tem influência limitada sobre o rendimento da grande maioria das culturas. No entanto, alguns fatores operacionais, econômicos, climáticos e agrônômicos podem limitar ou favorecer o uso da irrigação durante alguns períodos do dia.

No caso da aspersão, irrigações realizadas durante períodos de ventos intensos, baixa umidade relativa e temperatura elevada do ar, além de favorecerem maior perda de água por evaporação, prejudicam demasiadamente a distribuição de água na lavoura, afetando negativamente a produtividade da cultura. Segundo Bernardo et al. (2005), as perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento na irrigação por aspersão podem ultrapassar 10% para ventos a partir de 3 m s^{-1} e *ET_o* a partir de 8 mm dia^{-1} (Tabela 14). A uniformidade de distribuição de água é severamente afetada com o aumento da velocidade do vento. Segundo Cuenca (1989), um coeficiente de uniformidade de 80%, para uma condição com vento de 1 m s^{-1} , é reduzido a 65% quando a velocidade aumenta para 2 m s^{-1} e a para menos de 40% quando a velocidade atinge 4 m s^{-1} . Nesse aspecto, as irrigações por aspersão devem ser realizadas preferencialmente em horários sem vento ou de baixa intensidade, menor temperatura e alta umidade relativa do ar. Tais condições muitas vezes são encontradas nas primeiras horas da manhã, no final da tarde ou à noite.

Ainda no caso da aspersão, o horário da irrigação pode afetar a incidência e a severidade de algumas doenças da parte aérea, especialmente em hortaliças como a batata, o tomate e o pimentão. Visando a minimizar tal risco, principalmente em regiões sujeitas à formação de orvalho, as regas por aspersão devem ser realizadas, preferencialmente, depois das primeiras horas da manhã e antes das últimas horas da tarde, a fim de reduzir o tempo em que a água permanece livre sobre a folha, favorecendo a maioria dos fungos e bactérias. No entanto, se for comum a ocorrência de orvalho durante a noite, as irrigações podem ser coincidentes com o período de orvalho, não havendo, assim, o efeito aditivo do tempo de molhamento causado pela irrigação e pelo orvalho (LOPES et al., 2006). Irrigações diurnas em regiões ou épocas do ano em que não há ocorrência de orvalho são mais apropriadas do ponto de vista operacional da propriedade agrícola, mesmo no caso de patógenos que produzem esporos que são liberados durante o dia. Desde que não sejam realizadas no final da tarde, haverá tempo para que as folhas e as hastes sequem antes do entardecer (MAROUELLI et al., 2008c).

Irrigações por aspersão, especialmente durante as primeiras horas do dia, podem interferir negativamente na polinização e no pegamento de frutos de algumas espécies, pois prejudicam a atividade de abelhas e de outros insetos polinizadores (DIAS, 2005; OHIO STATE UNIVERSITY, 2009). A aplicação de água por aspersão e a ocorrência de chuvas durante o período em que as flores permanecem abertas podem também, como no caso do maracujazeiro-amarelo, reduzir a disponibilidade e a viabilidade de grãos de pólen, prejudicando a polinização.

Os sistemas por gotejamento e superfície (sulco) têm insignificante efeito no molhamento da parte aérea das plantas, pois aplicam água diretamente no solo e praticamente não são afetados pelas condições climáticas. Assim, com base nesses dois fatores, as irrigações podem ser realizadas em qualquer horário.

Alguns fatores operacionais podem ser determinantes na decisão do horário da irrigação. Sistemas de irrigação com capacidade limitada para atender a toda a área irrigada não permitem ao produtor muita flexibilidade para definir horários de irrigar. É comum, durante períodos de alta demanda de evapotranspiração, que sistemas de irrigação tenham de permanecer em operação ininterruptamente, dia após dia. Isso ocorre, principalmente, com sistemas tipo pivô central subdimensionados, que, mesmo ligados 24 horas por dia, são, muitas vezes, incapazes de suprir a demanda total de água da cultura.

Sistemas de irrigação fixos, como o gotejamento, e mecanizados, como o pivô central, podem irrigar durante a noite sem nenhum problema. No entanto, siste-

mas por sulco e aspersão convencional portátil e semiportátil, entre outros que demandam uso intensivo de mão de obra, são pouco apropriados para serem operados durante a noite.

Outro fator que pode ser decisivo na escolha do horário da irrigação é o custo da tarifa de energia elétrica. Existe uma tarificação reduzida para irrigar durante a noite, geralmente das 21h30 às 6h, com descontos que podem chegar a 90%. Para ter direito à tarifa reduzida, o produtor deve dirigir-se ao escritório da companhia elétrica local e aderir, por contrato, ao programa. Além de uma considerável redução de custos, a opção pela irrigação à noite dá mais tempo, durante o período diurno, e flexibilidade ao agricultor para realizar os tratos culturais necessários ao bom desenvolvimento da cultura. Entretanto, dependendo do dimensionamento do sistema de irrigação e da quantidade de horas planejadas para funcionamento por dia, poderá ser necessário complementar a irrigação da área em horários com outros valores de tarificação.

Para Talens (1998), algumas espécies de plantas podem ter problema de escaldadura por calor úmido quando se irriga nos horários mais quentes do dia, entre as 11h e as 16h, que coincidem com o período de máxima exigência hídrica das plantas. No Brasil, o problema não tem sido verificado na maioria das regiões produtoras de frutas e hortaliças.

Há condições, no entanto, em que a irrigação em horários muito quentes pode ser benéfica para amenizar o ambiente da cultura. Algumas espécies de plantas perdem temporariamente a turgescência mesmo quando a umidade do solo encontra-se próxima à capacidade de campo. Isso ocorre em razão da incapacidade das raízes de suprir a demanda evaporativa da atmosfera. A irrigação por aspersão durante breves períodos é capaz de amenizar o estresse hídrico; porém, ainda não há estudos sobre a resposta de incrementos de produtividade das culturas. Uma situação prática em que se adota essa estratégia é durante o estágio de pré-colheita de hortaliças folhosas, sem causar escaldadura de folhas. Segundo Callegari et al. (2001), quando plantas de alface apresentam sintomas iniciais de perda de turgescência, já aconteceu perda de aproximadamente 25% de sua matéria fresca quando túrgidas.

Quando se faz necessário restringir o horário das irrigações, em razão de qualquer fator limitante, o sistema de irrigação deve ser dimensionado para ter o funcionamento apenas durante o número máximo de horas por dia disponível para operação da irrigação. Caso contrário, o produtor não terá flexibilidade para irrigar toda a área nos horários desejados.

Referências

- AHUJA, L.R.; NIELSEN, D.R. Field soil-water relations. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1990. p. 143-190. (Agronomy, 30).
- ALBUQUERQUE, P. E. P. Estratégias de manejo de irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 449-486.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome, IT: FAO, 1998. 328 p. (FAO. Irrigation and Drainage Papers, 56).
- ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W. O.; PEREIRA, L. S.; JENSEN, M. E. Water requirements. In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. 2. ed. Saint Joseph: ASABE, 2007. p. 208-288.
- ANDRADE, C. L. T.; BORES JÚNIOR, J. C. F.; COUTO, L. Características físico-hídricas e dinâmica de água no solo. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O.M. (Ed.). **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 71-149.
- ATKINSON, D.; MACKIE-DAWSON, L. A. Root growth: methods of measurement. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed.). **Soil analysis**. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 447-509.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A água na agricultura**. Roma, IT: FAO, 1991. 218 p. (FAO. Irrigação e Drenagem, 29).
- BATAL, K.M.; SMITTLE, D.A. Response of bell pepper to irrigation, nitrogen, and plant population. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v.106, n. 3, p. 259-262, 1981.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: UFV, 2005. 611 p.
- BOSCH SERRA, A.D.; CURRAH, L. Agronomy of onions. In: RABINOWITCH, H.D.; CURRAH, L. (Ed.). **Allium crop science: recent advances**. Wallingford: CABI, 2002. p. 187-232.
- BRONER, I. **Irrigation scheduling**. Fort Collins: Colorado State University Cooperative Extension, 1993. 2 p. (Crop Series, 4.708).
- CALBO, A. G. **Gas irrigation control system based on soil moisture determination through porous capsules**. US Patent 6705542B2, 30 aug. 2001, 16 mar. 2004.
- CALBO, A. G. **Sistema de controle gasoso de irrigação baseado na determinação de umidade do solo por meio de cápsulas porosas**. Patente BR PI 0004264-1, 30 ago. 2000, 2 abr. 2002.
- CALBO, A. G.; SILVA, H. R.; MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Manejo de irrigação com sensores de cápsula porosa permeados por ar – IRRIGAS[®]. In: TALLER INTERNACIONAL RED RIEGOS CYTED, 2008, Florianópolis. [Anais]... Florianópolis: CYTED: PROCISUR, 2008. 12 p. 1 CD-ROM.
- CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C. Gaseous irrigation control system: descriptions and physical tests for performance assessment. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 501-510, 2006.
- CALLEGARI, O.; SANTOS, H. S.; SCAPIM, C. A. Variações do ambiente e de práticas culturais na formação de mudas e na produtividade da alface (*Lactuca sativa* L. cv. Elisa). **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1117-1122, 2001.
- CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation: a review. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 41, n. 5, p. 1353-1367, 1998.

CAMPBELL, G.S.; MULLA, D.J. Measurement of soil water content and potential. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1990. p. 127-142. (Agronomy, 30).

CARRIJO, O. A.; MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; SILVA, W. L. C. Produção de cebola sob diferentes regimes de umidade no solo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 8, n. 1, 1990. Resumo.

CHARTZOULAKIS, K.; PATAKAS, A.; KOFIDIS, G.; BOSABALIDIS, A.; NASTOU, A. Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relations and growth of two avocado cultivars.

Scientia Horticulturae, Amsterdam, NL, v. 95, n. 1/2, p. 39-50, 2002.

CHRISTOFIDIS, D. Como obter a sustentabilidade dos recursos hídricos na agricultura irrigada?

Irrigação & Tecnologia Moderna, Brasília, DF, v. 64, p. 30-31, 2004.

COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F.; SIMÕES, W. L.; COSTA, E. L. Uso regulado do déficit de irrigação nas fases de crescimento de frutos de lima ácida Tahiti irrigado por gotejamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2006. 1 CD-ROM.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; NASCIMENTO JUNIOR, A. L. Molhamento parcial do sistema radicular do limoeiro em condições semi-áridas do Norte de Minas. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 19., 2009, Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2009. 1 CD-ROM.

COELHO, E. F.; SOUSA, V. F.; AGUIAR NETTO, A. O. **Manejo de irrigação em fruteiras tropicais**.

Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2000. 48 p. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Circular Técnica, 40).

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M. F.; JORGE, L. A. C.; RALISH, R.; TOZZI, C. L.; TORRE, A.; VAZ, C. M. P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 18, n. 3, p. 365-371, 1994.

CUENCA, R. H. **Irrigation system design: an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 552 p.

CULLEN, P. The journey to sustainable irrigation. In: IRRIGATION ASSOCIATION OF AUSTRALIA ANNUAL CONFERENCE, 2004, Adelaide. **Proceedings...** Sydney: Irrigation Association of Australia, 2004. Disponível em: <www.thinkers.sa.gov.au/lib/pdf/Cullen_Irrigation_Conf.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2010.

DANIEL, R.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; SANTANA JUNIOR, E. B. Qualidade química de frutos da mangueira sob manejo de Irrigação utilizando o método MPSR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro/Petrolina. **Planejamento da bacia hidrográfica e o desenvolvimento da agricultura: anais**. Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. 1 CD-ROM.

DIAS, D. C. F. S. Maturação de sementes de hortaliças. In: CURSO SOBRE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE SEMENTES DE HORTALIÇAS, 5., 2005, Brasília, DF. **Palestras...** Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2005. 1 CD-ROM.

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.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome, IT: FAO, 1986. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome, IT: FAO, 1977. 144 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

- ENCISO, J. M.; PORTER, D.; PÉRIÈS, X. **Irrigation monitoring with soil water sensors**. College Station: Texas Cooperative Extension: Texas A&M University, 2007. 12 p. (B-6194).
- EVETT, S. R. Soil water and monitoring technology. In: LASCANO, R. J.; SOJKA, R. E. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. 2nd ed. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2007. p. 25-84. (Agronomy Monograph, 30).
- FARES, A.; ALVA, A. K. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. **Irrigation Science**, New York, v. 19, p. 57-64, 2000.
- FARIA, R. T.; COSTA, A. C. S. **Tensiômetro: construção, instalação e utilização**. Londrina: Iapar, 1987. 24 p. (Circular Técnica, 56).
- FERERES, E. Papel de la fisiología vegetal en la microirrigación: recomendaciones para el manejo mejorado. In: SEMINARIO LATINOAMERICANO DE MICROIRRIGACIÓN, 4., 1981, Barquisimeto. **Anais...** Barquisimeto: IICA, 1981. p. 1-23.
- FERREIRA, M. N. L. **Distribuição radicular e consumo de água de goiabeira (*Psidium guajava* L.) irrigada por microaspersão em Petrolina, PE**. 2004. 124 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- 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, n. 288-291, 1980.
- GOMIDE, R. L.; MAENO, P. Requerimento de água pelas culturas. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. (Ed.). **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 225-253.
- GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; CASTEL, J. R. Effects of regulated deficit irrigation on 'Clementina de Nules' citrus trees growth, yield and fruit quality. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 537, p. 749-758, 2000.
- GU, S. L.; DAVID, Z.; SIMON, G.; GREG, J. **Effect of partial root zone drying on vine water relations, vegetative growth, mineral nutrition, yield, and fruit quality in field-grown mature sauvignon blanc grapevines**. Fresno: California Agricultural Technology Institute: California State University, 2000. (Research Notes, 702).
- GUEYI, H. R.; LUZ, M. J. S.; BARRETO, A. N.; SILVA, A. A. G. Qualidade da água para fins de irrigação. In: BARRETO, A. N.; SILVA, A. A. G.; BOLFE, E. J. (Ed.). **Irrigação e drenagem na empresa agrícola: impacto ambiental versus sustentabilidade**. Aracaju: Embrapa Algodão, 2004. p. 331-377.
- GUROVICH, L. A. Irrigation scheduling of table grape cultivars in Chile. In: CAMP, C. R.; SADLER, E. J.; YODER, R. E. (Ed.). **Evapotranspiration and irrigation scheduling**. San Antonio: ASAE, 1996. p. 335-340.
- HAISE, H. R.; HAGAN, R. M. Soil, plant, and evaporative measurements as criteria of scheduling irrigation. In: HAGAN, R. M.; HAISE, H. R.; EDMINSTER, T. W. (Ed.). **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p. 577-604. (Agronomy Series, 11).
- HANSON, B. R. Error in using historical reference crop evapotranspiration for irrigation scheduling. In: EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION SCHEDULING, 1996, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: ASAE: Irrigation Association: International Commission on Irrigation and Drainage, 1996. p. 220-224.
- HATFIELD, J. L.; SNYDER, R. L. Infrared thermometers. In: GOLDHAMER, D. A.; SNYDER, R. L. (Ed.). **Irrigation scheduling: a guide for efficient on-farm water management**. Oakland: DARN: University of California, 1989. p. 21-20.
- HEERMANN, D. F.; MARTIN, D. L.; JACKSON, R. D.; STEGMAN, E. C. Irrigation scheduling controls and techniques. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1990. p. 509-535. (Agronomy, 30).

HIDROSENSE. **Irrigação na medida certa**: linha digital. Disponível em: <http://www.hidrosense.com.br/produtos_mdi.html>. Acesso em: 12 fev. 2010.

HOFFMAN, G. J.; SHALHEVET, J. Controlling salinity. In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd ed. Saint Joseph: ASABE, 2007. p. 160-207.

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

IRRIGATION on western farms. Washington, DC: Soil Conservation Service, 1959. 53 p. (Agricultural Information Bulletin, 199).

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER JUNIOR, P. J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resource Research**, Washington, DC, v. 17, n. 4, p. 1133-1138, 1981.

JENSEN, M. E. Sustainable and productive irrigated agriculture. In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd ed. Saint Joseph: ASABE, 2007. p. 33-56.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332 p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 70).

JONES, H. G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls on plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, London, GB, v. 55, n. 407, p. 2427-2436, 2004.

KANG, S. Z.; HU, X. T.; GOODWIN, I.; JIRIE, P.; ZHANG, J. Soil water distribution, water use and yield response to partial root zone drying under flood-irrigation condition in a pear orchard. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, NL, v. 92, p. 277-291, 2002.

KANISZEWSKI, S.; RUMPEL, J. Effects of irrigation, nitrogen fertilization and soil type on yield and quality of cauliflower. **Journal of Vegetable Crop Production**, Calhoun, v. 4, p. 67-75, 1998.

KELLER, J. **Trickle irrigation**: section 15-7: national engineering handbook. Glendora: Soil Conservation Service: USDA, 1978. 129 p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: VanNostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KONGYAN, Y. Water-saving farming technologies. **New AG International**, Middlesex, p. 46-53, 2005.

LAMONT JUNIOR, W. J.; ORZOLEK, M. D.; HARPER, J. K.; JARRETT, A. R.; GREASER, G. L. **Drip irrigation for vegetable production**. Disponível em: <<http://agalternatives.aers.psu.edu/Publications/Driplrrigation.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2007.

LASCANO, R. J. The soil-plant-atmosphere system and monitoring technology. In: LASCANO, R. J.; SOJKA, R. E. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. 2nd ed. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2007. p. 85-115. (Agronomy Monograph, 30).

LIBARDI, P. L. **Potenciais da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, 1993. 50 p. (Série Didática, 7).

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. In: FREITAS, M. A. V. (Ed.). **O estado das águas no Brasil - 1999**: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília, DF: Aneel: OMM: SRH-MMA, 1999. p. 73-82.

LOPES, C. A.; MAROUELLI, W. A.; CAFÉ FILHO, A. C. Associação da irrigação com doenças de hortaliças. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, Passo Fundo, v. 14, p. 151-179, 2006.

- LOPEZ, J. R.; ABREU, J. M. H.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. **Riego localizado**. 2. ed. Madrid, ES: Mundi-Prensa, 1997. 405 p.
- LOVEYS, B. R.; DRY, P. R.; STOLL, M.; MCCARTHY, M. G. Using plant physiology to improve the water efficiency of horticultural crops. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 537, p. 187-197, 2000.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação**: princípios e práticas. Viçosa: UFV, 2006. 318 p.
- MAROUELLI, W. A. Desenvolvimento de critério para manejo simplificado da irrigação em regiões áridas e semi-áridas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBEA: UFC, 2000. 3 p. 1 CD-ROM. Trabalho no 057.
- MAROUELLI, W. A. **Tensiómetros para o controle de irrigação em hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2008. 15 p. (Embrapa Hortaliças. Circular Técnica, 57).
- MAROUELLI, W. A.; ABDALLA, R. P.; MADEIRA, N. R.; Irrigação de cebola em sistema de plantio direto. **Revista de Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 17, n. 105, p. 7-9, 2008b.
- MAROUELLI, W. A.; ABDALLA, R. P.; MADEIRA, N. R. Irrigação de repolho em sistema de plantio direto. **Revista de Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 19, n. 112, p. 32-34, 2009.
- MAROUELLI, W. A.; CALBO, A. G. **Manejo de irrigação em hortaliças com sistema Irrigas®**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2009. 16 p. (Circular Técnica, 69).
- MAROUELLI, W. A.; GIORDANO, L. B.; OLIVEIRA, C. A.; CARRIJO, O. A. Desenvolvimento, produção e qualidade da ervilha sob diferentes tensões de água no solo, em dois estádios da cultura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 7, p. 1041-1047, 1991a.
- MAROUELLI, W. A.; GUIMARÃES, T. G. **Irrigação na cultura da batata**. Itapetininga: Associação Brasileira da Batata: Embrapa Hortaliças, 2006. 66 p.
- MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; GIORDANO, L. B. Paralisação das irrigações em cultivar precoce de ervilha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 12, p. 1769-1773, 1990.
- MAROUELLI, W. A.; SANT'ANA, R. R.; SILVA, H. R. Economic evaluation of irrigation systems for processing tomato production in central Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2008, Iguassu Falls City. **Proceedings...** Iguassu Falls City: CIGR: SBEA: ASABE, 2008a. 1 CD-ROM.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; OLIVEIRA, C. A. S. Produção de tomate industrial sob diferentes regimes de umidade no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 9, p. 1531-1537, 1991b.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Parâmetros básicos para manejo de irrigação por aspersão em tomateiro para processamento na região do cerrado. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15., 2005, Teresina. **Anais...** Teresina: ABID, 2005. 1 CD-ROM.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; CARRIJO, O. A.; SILVA, H. R. Produção e qualidade de alho sob regimes de água no solo e doses de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 2, p. 191-194, 2002a.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; MORETTI, C. L. Desenvolvimento de plantas, produção e qualidade de bulbos de alho sob condições de deficiência de água no solo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 3, p. 470-473, 2002b.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; OLIVEIRA, C. A. S.; SILVA, H. R. Resposta da cultura da batata a diferentes regimes de irrigação. **Revista Latinoamericana de la Papa**, Bogotá, DC, v. 1, n. 1, p. 25-34, 1988.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Irrigação por aspersão em hortaliças**: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Hortaliças, 2008c. 150 p.

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

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R.; VILELA, N. J. Eficiência econômica do manejo racional da irrigação em tomateiro para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, n. 3, p. 238-243, 2000.

MARTIN, D. L.; GILLEY, J. R. **Irrigation water requirements**. Washington, DC: USDA: Soil Conservation Service, 1993. 284 p. (National Engineering Handbook, Part 623).

MAURER, A. R. Response of broccoli to five soil water regimes. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, CA, v. 56, p. 953-959, 1976.

MENZEL, C. M.; SIMPSON, D. R. Passionfruit. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. (Ed.). **Handbook of environmental physiology of fruit crops**. Boca Raton: CRC, 1994. v. 2, p. 225-241.

MONTENEGRO, A. A. T.; BEZERRA, F. M. L.; LIMA, R. N. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 464-472, 2004.

NEJA, R. A.; WILDMAN, W. E.; AYERS, R. S.; KASIMATIS, A. N. Grapevine response to irrigation and trellis treatments in the Salinas Valley. **American Journal of Enology and Viticulture**, Reedley, v. 28, n. 1, p. 16-26, 1977.

OHIO STATE UNIVERSITY. **Vegetable seed production**: "dry" seeds. Disponível em: <<http://extension.osu.edu/~seedsci/vsp02.html>>. Acesso em: 18 abr. 2009.

OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; FACCIOLI, G. G. **Manejo básico da irrigação na produção de fruteiras**. Brasília, DF: LK, 2006. 136 p.

OSTER, J. D.; WICHELNS, D. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. **Irrigation Science**, New York, v. 22, p. 107-120, 2003.

PEREIRA, A. B.; SHOCK, C. C.; FEIBERT, E. B.; LIMA, L.; FERNANDES, N. **Monitoramento da irrigação por meio da tensão de água no solo**. Ponta Grossa: UEPG, 2006. 20 p. (Boletim Técnico).

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

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 4, p. 118-143, 1997.

PHENE, C. J.; REGINATO, R. J.; ITIER, B.; TANNER, B. R. Sensing irrigations needs. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Irrigation of agricultural lands**. Madison: ASAE, 1992. p. 207-261. (ASAE Monograph, 9).

PONTES, C. G. M. **Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultivo do abacaxi (*Ananas comosus* (L.) Merrill) através de lisímetro de pesagem de precisão para a região litorânea do Ceará**. 2002. 110 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.

RHOADES, J. D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1990. p. 1089-1142. (Agronomy, 30).

- RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, DC: USDA, 1954. 160 p. (USDA. Agricultural Handbook, 60).
- ROSEGRANT, M. W.; CAI, X.; CLINE, S. A. **Global water outlook to 2025: averting an impending crisis**. Washington, DC: International Food Policy Research Institute: International Water Management Institute, 2002. 28 p.
- SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI, M.; KALFOUNTZOS, D.; VYRLAS, P. Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. **Global Nest: The International Journal**, Atenas, v. 4, n. 2/3, p. 85-91, 2002.
- SAMMIS, T. W. Comparison of sprinkler, trickler, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 5, p. 701-704, 1980.
- SANDERS, D. C. **Vegetable crop irrigation**. Raleigh: North Carolina Cooperative Extension Service, 1997. 6 p. (Horticulture Information Leaflet, 33-E).
- SARAF, C. S.; BAITHA, S. P. Water use patterns and water requirement of lentil planted on different dates. **Lens Newsletter**, Aleppo, v. 12, n. 1, p. 12-15, 1985.
- SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; BRADSTRET, E. D.; HEMMINGSEN, E. A. Sap pressure in vascular plants. **Science**, Cambridge, v. 148, p. 339-346, 1965.
- SHOCK, C. C.; PEREIRA, A. B.; HANSON, B. R.; CAHN, M. D. Vegetable irrigation. In: LASCANO, R. J.; SOJKA, R. E. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. 2nd ed. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2007. p. 535-606. (Agronomy Monograph, 30).
- SILVA, A. J. P.; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da umidade do solo em bananeira irrigada por sistemas de gotejamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 18., 2008, São Mateus. **Anais...** São Mateus: ABID, 2008. 1 CD-ROM.
- SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A.; GUERRA, A. F.; FIGUERÊDO, S. F.; ANDEADE, L. M.; ANTONINI, J. C. A. **Manejo de irrigação por tensiometria para culturas de grãos na região do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 60 p. (Circular Técnica, 6).
- SILVA, H. R. Manejo da irrigação do milho-doce (*Zea mays* L.) em tempo real usando o termômetro infravermelho. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 22, n. 2, 2004. Suplemento 2. 1 CD-ROM.
- SILVA, J. F.; SIMÃO, S. Influência da umidade do solo na produção do tomateiro. **Boletim Técnico DNOCS**, Fortaleza, v. 31, n. 2, p. 159-193, 1973.
- SILVA, W. L. C.; VIEIRA, J. V.; CARRIJO, O. A. Efeito de diferentes tensões de umidade do solo sobre a cultura da cenoura em fase de desenvolvimento ativo do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, n. 2, p. 221-224, 1982.
- SIMONNE, E. H.; DUKES, M. D.; HAMAN, D. Z. Principles of irrigation management for vegetables. In: OLSON, S. M.; SIMONNE, E. H. (Ed.). **The vegetable production handbook for Florida**. Gainesville: University of Florida: IFAS Extension, 2006. p. 33-39. (AE260 Horticultural Sciences Dept.).
- SINGANDHUPE, R. B.; RAO, G. S. N.; PATIL, N. G.; BRAHMANAND, P. S. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.). **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, NL, v. 19, p. 327-340, 2003.
- SINGH, B. P. Irrigation water management for bush snap bean production. **HortScience**, Alexandria, v. 24, n. 1, p. 69-70, 1989.
- SMAJSTRLA, A. G.; PITTS, D. J. **Tensiometer service, testing and calibration**. Gainesville: University of Florida, 1997. 5 p. (Bulletin, 319).

- SMITH, M.; HANCOCK, N. H. Leaching requirement of irrigated soil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, NL, v. 11, p. 13-22, 1986.
- SMITTLE, D. A.; HALL, M. R.; STANSELL, J. R. Effects of irrigation regimes on yield and water use by sweet potato. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 115, n. 5, p. 712-714, 1990.
- SOUZA, C. R.; MAROCO, J. P.; CHAVES, M. M.; SANTOS, T.; RODRIGUEZ, A. S.; LOPES, C.; RODRIGUES, M. L.; PEREIRA, J. S. Effects of partial root drying on the physiology and production of grapevines. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 646, p. 121-126, 2004.
- SOUZA, M. S. M.; BEZERRA, F. M. L.; VIANA, T. V. A.; TEÓFILO, E. M.; CAVALCANTE, I. H. L. Evapotranspiração do maracujá nas condições do Vale do Curu. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 2, p. 11-16, 2009.
- STANSELL, J. R.; SMITTLE, D. A. Effects of irrigation regimes on yield and water use of summer squash. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 114, n. 2, p. 196-199, 1989.
- STEGMAN, E. C.; MUSICK, J. T.; STEWART, J. I. Irrigation water management. In: JENSEN, M. E. **Design and operation of farm irrigation systems**. Saint Joseph: ASAE, 1983. p. 763-816. (ASAE Monograph, 3).
- STOLL, M.; LOVEYS, B. R.; DRY, P. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**, London, GB, v. 51, p. 1627-1634, 2000.
- STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 4, p. 835-841, 2000.
- SYVERTSEN, J. P.; LLOYD, J. Citrus. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. (Ed.). **Handbook of environmental physiology of fruit crops**. Boca Raton: CRC, 1994. v. 2, p. 65-99.
- TALENS, J. A. M. **Riego localizado y fertirrigación**. 2. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1998. 392 p.
- TAYLOR, S. A. Managing irrigation water on the farm. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 8, p. 433-436, 1965.
- THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; VALDEZ, L. C.; FERNANDEZ, M. D. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, NL, v. 88, n. 1-3, p. 147-158, 2007.
- TURNER, D. W. Banana. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P. (Ed.). **Handbook of environmental physiology of fruit crops**. Boca Raton: CRC, 1994. v. 2, p. 37-64.
- WESTHUIZEN, A. J. van der; ANNANDALE, J. G.; BENADÉ, N. Encouraging irrigation scheduling: a cost-benefit approach. In: IRRIGATION Scheduling: from theory to practice. Rome, IT: FAO, 1996. Disponível em: <www.fao.org/docrep/w4367e/w4367e0s.htm>. Acesso em: 26 fev. 2010.
- WILLIAMS, L. E.; MATTHEWS, M. A. Grapevine. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1990. p. 1019-1055. (Agronomy, 30).
- WRIGHT, J. L.; STARK, J. C. Potato. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1990. p. 859-888. (Agronomy, 30).
- YANG, S. L.; AYDIN, M.; YANO, T.; LI, X. Evapotranspiration of orange trees in greenhouse lysimeters. **Irrigation Science**, New York, v. 21, p. 145-149, 2003.