

Capítulo 9

Estratégias de manejo de irrigação

Paulo Emílio Pereira de Albuquerque

Introdução

A água, no contexto da agricultura irrigada, contribui com aproximadamente 33% a 38% do custo de produção (Resende et al., 1990; Richetti et al., 2015) conforme será apresentado em capítulo posterior. Por isso, reduções em produtividade não podem ser esperadas em decorrência da falta ou do excesso de água aplicada.

A aplicação de pouca água (irrigação com déficit) pode ser um desperdício óbvio, tendo em vista que a produção não poderia obter o benefício esperado. A aplicação excessiva é, entretanto, muito mais destrutiva, pois ocorre saturação do solo, o que impede a sua aeração, lixivia nutrientes, induz maior evaporação e provoca maior desperdício de água e de energia para o bombeamento (elétrica ou outras). Além disso, excesso de água propicia microclima favorável ao desenvolvimento de doenças e pragas que podem causar prejuízo à cultura.

Assim, pode-se dizer que o manejo da irrigação cobre os seguintes objetivos básicos:

- Maximizar a produtividade da cultura.
- Melhorar a qualidade do produto.
- Minimizar o custo da água e da energia.
- Aumentar a eficiência de fertilizantes.
- Diminuir a incidência de doenças e pragas.
- Manter ou melhorar as condições químicas e físicas do solo.

Apesar de todos esses benefícios e do alto investimento realizado pelos agricultores, a maioria deles não dá a devida importância ao

manejo da irrigação. Segundo Silveira e Stone (1994), várias causas podem ser citadas para explicar tal atitude:

- **Custo da água:** na maioria das situações, a água nada custa ao produtor irrigante.
- **Custo da energia elétrica:** o custo da energia elétrica geralmente não é tão alto, podendo girar em torno de 10% do custo total da produção.
- **Carência de dados edafoclimáticos:** o irrigante normalmente não dispõe de análises físico-hídricas do solo e de dados climáticos da sua área.
- **Prioridade das atividades:** a preocupação maior dos produtores no dia a dia é com o calendário de aplicação de adubos, com um possível ataque de doenças e pragas em sua lavoura e com o desenvolvimento da cultura em campo.
- **Técnico e/ou consultoria especializada:** a assistência técnica ao produtor não fornece as opções de manejo da irrigação ou por desconhecimento ou por falta de interesse ou, ainda, porque não há demanda por parte do irrigante.
- **Metodologia:** embora disponível, ainda não foi apresentada aos produtores de forma acessível, de modo que facilite a sua adoção.

Para exemplificar, em determinadas situações, o consumo de água de uma cultura pode ser três vezes maior no meio do ciclo dessa cultura em relação à fase inicial. Além disso, dependendo da região, a evapotranspiração da cultura (ET_c) pode ser muito maior no verão do que no inverno. Isso está ilustrado na Tabela 1, que mostra

Tabela 1. Influência do estágio de desenvolvimento da cultura do milho e época do ano sobre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e sobre o intervalo entre as irrigações (Fazenda Sooretama, Incaper, ES).

Plantio	Mês da irrigação	Kc	ET _o (mm dia ⁻¹)	ET _c (mm dia ⁻¹)	Z (cm)	f	LL	F (dias)
Novembro	Janeiro	1,10	5,60	6,16	25	0,60	13,4	2
Julho	Julho	0,45	2,27	1,02	20	0,80	14,2	14
Variações (%)	-	144	147	500	25	25	-	600

Kc = Coeficiente de cultura (Doorenbos; Pruitt, 1977). ET_o = Evapotranspiração de referência. ET_c = Evapotranspiração da cultura ($ET_c = ET_o \times Kc$). Z = Profundidade efetiva do sistema radicular. f = Fator de disponibilidade da água no solo. LL = Lâmina líquida de irrigação. F = Frequência de irrigação.

variação de 500% na necessidade de água e de 600% no intervalo entre irrigações, estimados para as condições da Fazenda Sooretama, do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), situada no norte do estado do Espírito Santo. Essas variações se deveram principalmente ao estágio de desenvolvimento da cultura e da época do ano em que as irrigações foram realizadas.

Pode-se verificar redução de produtividade com a aplicação insuficiente de água ao longo do ciclo da cultura. Essas perdas de produtividade em relação à produtividade com nível ótimo de água podem atingir níveis elevados de forma não linear, ou seja, por exemplo, uma redução pela metade (50%) da água necessária à cultura nas doses unitárias de irrigação pode representar uma perda muito grande de rendimento (maior até que 90%).

A suspensão das irrigações muito antecipada à completa maturação da cultura pode também apresentar um efeito negativo na produtividade. E essa redução também ocorre normalmente de forma não linear, ou seja, por exemplo, supressão de seis das últimas irrigações previstas pode causar redução do rendimento de ordem maior que 80%, e supressão das duas últimas irrigações previstas pode causar redução de cerca de 50% (Albuquerque et al., 1992).

Neste capítulo, pretende-se apresentar alguns métodos simples para responder as duas perguntas clássicas no manejo da irrigação: quando e quanto irrigar. Definido o momento e a quantidade de água a aplicar, o irrigante passa

a depender exclusivamente do desempenho e das características do seu sistema ou equipamento de irrigação. O mau desempenho de qualquer sistema ou equipamento, quanto à uniformidade de distribuição de água e à aplicação de lâminas de água diferentes daquelas solicitadas, diminui a eficiência do manejo.

Alguns critérios de manejo de irrigação

Muitos conceitos e nomenclaturas que serão usados, neste capítulo, são considerados já conhecidos pelo leitor, pois foram vistos em capítulos anteriores. Portanto, somente os novos conceitos serão mais detalhados.

Frequência de irrigação fixa

A frequência de irrigação (F), também comumente denominada turno de rega, é o intervalo entre duas irrigações sucessivas. Quando se utiliza o seu valor fixo, há uma grande facilidade no manejo da irrigação, porém os erros podem ser maiores, tendo em vista que é um método baseado num valor fixo da ET_c , que é a utilizada no projeto ou planejamento do sistema de irrigação. Entretanto, na realidade, seu valor é variável com o tipo e a fase da cultura e a época de plantio. Para minimizar esses erros, poder-se-ia variar a frequência de irrigação de acordo com os estádios da cultura (ver seção Fases do Ciclo de Culturas Anuais), o que será discutido um pouco mais adiante.

Assim, de acordo com o grau de aproximação que se deseja, a lâmina líquida (LL) de irrigação pode ser calculada por:

$$LL = CAD \times f \times Z \quad (1)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); CAD é a capacidade de água total disponível do solo (mm de água cm^{-1} de solo); f é o coeficiente de disponibilidade ($0 < f < 1$); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

A capacidade de água total disponível do solo (CAD) é a água no solo que está retida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Assim:

$$CAD = [(CC - PMP) \times d] / 10 \quad (2)$$

em que CAD é a capacidade de água total disponível no solo (mm de água cm^{-1} de solo); CC é o conteúdo de água no solo na capacidade de campo (%peso); PMP é o conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente (%peso); e d é a densidade do solo (g de solo cm^{-3} de solo).

Quando CC e PMP são dados em % volume, é desnecessário incorporar o valor de d na Equação 2, pois esse termo já está implícito no volume de solo.

As metodologias para determinação dos valores de CC e PMP já foram vistas em outro capítulo. Como recapitulação, vale lembrar que a CC é a quantidade de água retida no solo após a drenagem do excesso da água gravitacional, cujo valor está compreendido entre os potenciais matriciais de -10 kPa a -30 kPa (-0,01 MPa a -0,03 MPa – veja a tabela de conversão de unidades de pressão no box a seguir. A melhor forma de definir com maior exatidão o seu valor é determiná-lo no próprio local, conforme metodologia apresentada por Reichardt (1987). O PMP é o limite inferior do conteúdo de água no solo, no qual a CAD se esgotou; nesse ponto, as plantas não têm condições de manter a

turgescência do tecido vegetal e murcham de forma permanente. O valor normalmente estabelecido para o PMP está sob o potencial matricial de -1.500 kPa (-1,5 MPa).

1 bar = 100 cbar	
1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa	1 atm = 0,1013 MPa = 101,3 kPa
1 bar = 1.020 cmH_2O	1 atm = 1.033,3 cmH_2O
1 bar = 0,9869 atm	1 atm = 1,0133 bar
1 cmHg = 13,6 cmH_2O	1 cmH_2O = 0,0736 cmHg

A curva de retenção da água no solo, exemplificada na Figura 1, auxilia bastante a definição da CAD .

Na maioria das situações, a CAD de um solo não é conhecida. Nesses casos, pode-se estimá-la, de modo mais expedito, pelos valores constantes na Tabela 2, desde que se tenha ideia da textura do solo.

A utilização da Tabela 2 requer certo cuidado, principalmente em alguns Latossolos do Cerrado, pois, apesar de a textura desses se apresentar argilosa, eles se comportam como solos de textura arenosa (CAD entre 70 mm m^{-1} e 100 mm m^{-1}), em função da presença de óxidos

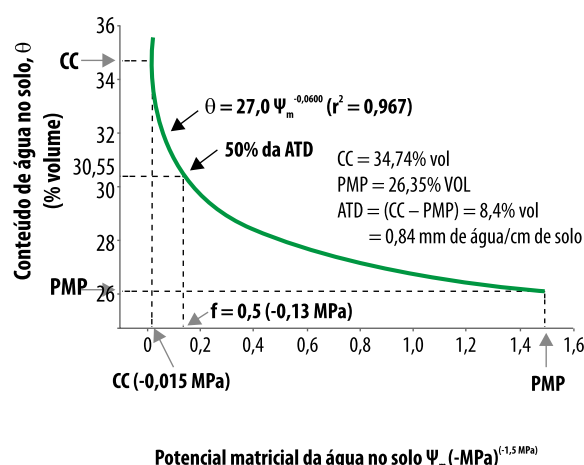


Figura 1. Curva de retenção da água no solo, em que se definem a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP), a capacidade total de água disponível (CAD) e o coeficiente de disponibilidade (f), para o perfil de 0 a 90 cm do Latossolo Vermelho-Escuro da área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Fonte: Albuquerque (1997).

Tabela 2. Valores⁽¹⁾ aproximados para algumas características físico-hídricas dos solos, segundo a sua classe textural.

Textura do solo	VIB ⁽²⁾ (cm h ⁻¹)	Densidade (g cm ⁻³)	CC ⁽³⁾ (%peso)	PMP ⁽⁴⁾ (%peso)	CAD ⁽⁵⁾ (%peso)	CAD ⁽⁶⁾ (mm m ⁻¹)
Arenoso	5 (2,5–22,5)	1,65 (1,55–1,80)	9 (6–12)	4 (2–6)	5 (4–6)	85 (70–100)
Franco-arenoso	2,5 (1,3–7,6)	1,50 (1,40–1,60)	14 (10–18)	6 (4–8)	8 (6–10)	120 (90–150)
Franco	1,3 (0,8–2,0)	1,40 (1,35–1,50)	22 (18–26)	10 (8–12)	12 (10–14)	170 (140–190)
Franco-argiloso	0,8 (0,25–1,5)	1,35 (1,30–1,40)	27 (25–31)	13 (11–15)	14 (12–16)	190 (170–220)
Silto-argiloso	0,25 (0,03–0,5)	1,30 (1,25–1,35)	31 (27–35)	15 (13–17)	16 (14–18)	210 (190–230)
Argiloso	0,05 (0,01–0,1)	1,25 (1,20–1,30)	35 (31–39)	17 (15–19)	18 (16–20)	230 (200–250)

⁽¹⁾ Primeiro valor representa a média e os valores entre parênteses representam a faixa de variação. ⁽²⁾ VIB = velocidade de infiltração básica.

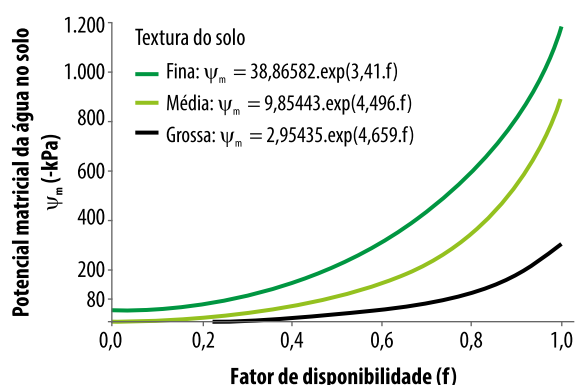
⁽³⁾ CC = umidade do solo na capacidade de campo. ⁽⁴⁾ PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente. ⁽⁵⁾ CAD = água total disponível = (CC – PMP). ⁽⁶⁾ CAD em lâmina de água por profundidade de solo.

Fonte: Vermeiren e Jobling (1997).

de ferro, que favorecem a formação de agregados pequenos, bastante estáveis, de comportamento semelhante à areia (Resende et al., 1995).

A capacidade total de água disponível (CAD), como foi visto, depende da textura e da estrutura do solo, portanto, é variável com o tipo de solo. Apesar de o conceito de CAD definir que toda a água em sua faixa está disponível para a planta, na realidade a água é mais facilmente disponível quando está próxima da capacidade de campo (CC). Como pode ser observado pela curva de retenção (Figura 1), à medida que há extração de água pelo sistema radicular das plantas, o potencial da água no solo diminui, e a água restante torna-se mais difícil de ser retirada, tendo em vista estar retida a uma maior sucção.

A Figura 2 mostra as curvas do coeficiente ou fator de disponibilidade (f) da água no solo em função do potencial matricial (ψ_m) para solos de diferentes texturas. O valor de $f = 0$ representa que não há depleção, ou seja, solo com umidade na capacidade de campo, e $f = 1$ representa solo sem água disponível, ou seja, no PMP. As curvas são diferentes para cada tipo de solo por causa da diferença na distribuição dos

**Figura 2.** Coeficiente ou fator de disponibilidade (f) da água no solo em função do potencial matricial da água no solo (ψ_m), para solos de diferentes texturas.

Fonte: Adaptado de Grattan et al. (1989).

tamanhos de poros. Nota-se que a maior parte da CAD em solo de textura grossa (arenosos) está retida no potencial maior que -100 kPa (-0,1 MPa), enquanto, em solos de textura fina (argilosos), a maior parte está retida em potenciais bem menores do que -100 kPa.

Por causa desse maior grau de dificuldade de extração de água pelas plantas em potenciais menores é que se definiu o termo água facilmente disponível (AFD). A AFD é usada no lugar da CAD porque não se deve deixar que o

conteúdo de água no solo atinja o *PMP*. Por isso, em função da cultura, das condições de clima e de solo, é estabelecido o coeficiente ou fator de disponibilidade ou de depleção (f), tendo em vista o maior ou menor grau de dificuldade que a planta poderá ter para extrair água do solo. O termo $(CAD \times f)$, na Equação 1, representa a *AFD*. O coeficiente ou fator de disponibilidade f representa a fração de esgotamento de água no solo, que pode ser obtido na Tabela 3, em função do grupo de culturas e da *ETc* máxima. Assim, por exemplo, para culturas altamente exigentes em água, como as hortaliças, o valor de f está em torno de 0,25, permanecendo o solo com uma reserva de 75%. Culturas como cereais e pastagens podem ter o valor de f em torno de 0,50, e as fruteiras perenes em torno de 0,40 (Doorenbos; Kassam, 1979).

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z) pode ser estimada para algumas culturas pela Tabela 4. Obviamente, nessa tabela estão os valores após a cultura ter atingido o seu pleno desenvolvimento; na fase inicial, esses valores são menores, pois o sistema radicular ainda está se desenvolvendo. Pode-se considerar que, na fase inicial, o sistema radicular vai-se desenvolvendo a partir da profundidade de semeadura até atingir o seu valor máximo, que deve ocorrer no término da fase 2 em culturas de ciclo curto. Ainda pode-se assumir que o seu desenvolvimento é linear a partir da profundidade de semeadura até atingir a fase 3, como está representado na Figura 3. As fases do ciclo cultural, representadas na Figura 3, são as mes-

Tabela 4. Profundidade efetiva média (Z) do sistema radicular de algumas culturas.

Cultura	Z (cm)
Abacaxi	20
Algodão	30
Amendoim	50–60
Arroz	20–30
Banana	40
Batata	20–30
Café	50
Cana-de-açúcar	50–70
Cebola	20
Culturas perenes	50–70
Feijão	20–30
Melancia, melão	30
Milho	40–50
Pastagem	30
Soja	40–50
Tomate, fumo	20–50
Trigo	30–40
Videira	50

Fonte: Arruda et al. (1987) e Moreira (1993).

mas supostas para a obtenção do coeficiente de cultura (Kc), conforme metodologia descrita no manual 24 da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (Doorenbos; Pruitt, 1977), e que também serão apresentadas mais adiante.

Ao se assumir uma profundidade efetiva (Z) para o sistema radicular da cultura, pode ser que na realidade esse esteja mais raso ou mais

Tabela 3. Fator de disponibilidade (f) para grupos de cultura em função da evapotranspiração máxima da cultura (ETc).

Grupo de cultura ⁽¹⁾	ETm (mm dia ⁻¹)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,50	0,425	0,35	0,30	0,25	0,225	0,20	0,20	0,175
2	0,675	0,575	0,475	0,40	0,35	0,325	0,275	0,25	0,225
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30
4	0,875	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,425	0,40

⁽¹⁾ 1 – cebola, pimentão e batata; 2 – banana, repolho, uva, ervilha e tomate; 3 – alfafa, feijão, citros, amendoim, abacaxi, girassol, melancia e trigo; 4 – algodão, milho, azeitona, açafrão, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar e fumo.

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979).

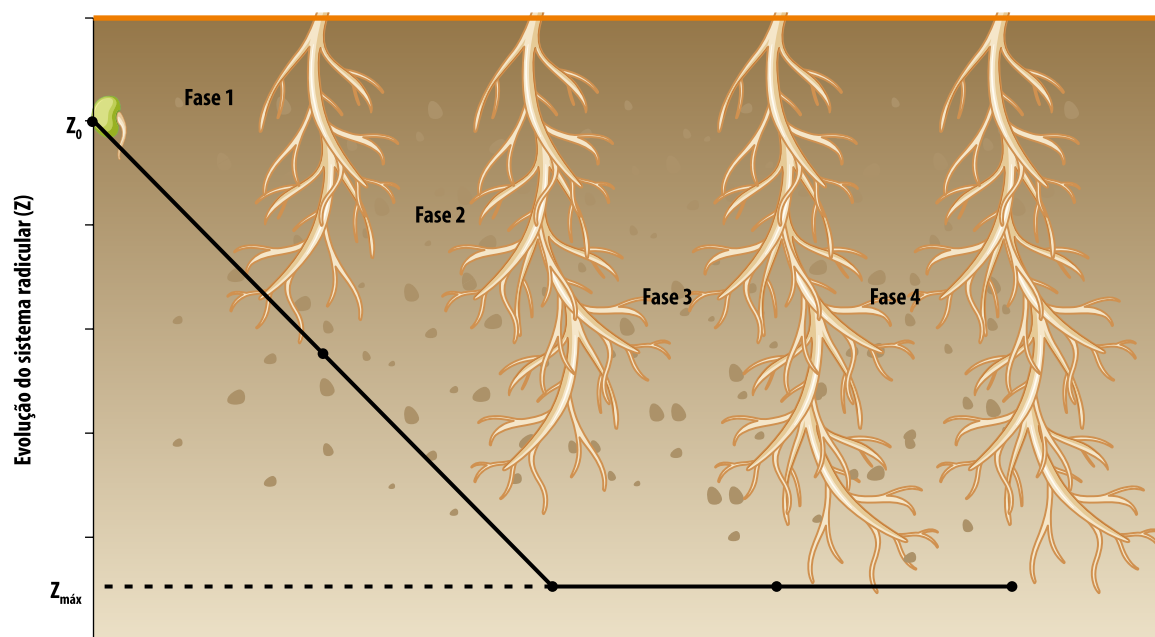


Figura 3. Estimativa do desenvolvimento do sistema radicular de culturas de ciclo curto em função das fases do ciclo da cultura (Z_0 é a profundidade de semeadura, e $Z_{m\acute{a}x}$ é a profundidade efetiva do sistema em seu desenvolvimento máximo).

Ilustração: Carlos Eduardo Felice Barbeiro.

profundo. Desse modo, pode-se enfatizar o seguinte:

- Se o Z estiver realmente mais raso, supondo que esteja mais profundo – isso significa que o solo na zona radicular ficará seco por mais tempo, com irrigações menos frequentes.
- Se o Z estiver realmente mais profundo, supondo que esteja mais raso – isso significa que o solo na zona radicular permanecerá sempre úmido, com irrigações mais frequentes.

Tendo-se obtido a LL pela Equação 1, pode-se estimar a lâmina bruta (LB) por:

$$LB = LL/Ei \quad (3)$$

em que LB é a lâmina bruta de irrigação (mm); LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); e Ei é a eficiência do sistema de irrigação (decimal, ou seja, %/100) (Tabela 5).

A frequência de irrigação (F), caso se baseie na ETc do projeto do sistema de irrigação, apresentar-se-á com o seu valor fixo, como já foi mencionado, do seguinte modo:

$$F = LL/ETc \quad (4)$$

em que F é a frequência de irrigação (dias); LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); e ETc é a evapotranspiração da cultura obtida do projeto (mm dia^{-1}).

A ETc normalmente obtida no projeto do sistema de irrigação é o valor crítico para uma determinada cultura e situação edafoclimática, dentro de um nível de probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais ao preestabelecido. Para projetos com finalidade agrícola, geralmente, esse nível é de 75%. Dessa forma, por exemplo, se o valor estabelecido foi de 6 mm dia^{-1} , com 75% de probabilidade de ocorrência, haverá 25% de chance de esse valor ser ultrapassado, ou seja, há um risco de 25% de probabilidade de a cultura sofrer déficit hídrico, caso essa se encontre na fase crítica de consumo de água, que ocorre comumente no período reprodutivo. Outra interpretação que pode ser dada é que, a cada 4 anos (período de



Exemplo de cálculo de frequência de irrigação fixa

Tabela 5. Alguns valores de eficiência de irrigação (E_i), segundo o sistema de irrigação.

Sistema	E_i atingível (%)
Irrigação superficial	
Tabuleiros inundáveis	80 a 90
Faixas	70 a 85
Sulcos	60 a 75
Irrigação por aspersão	
Convencional fixo	70 a 80
Convencional móvel	65 a 75
Autopropelido	60 a 70
Pivô central e Linear móvel	75 a 90
Irrigação localizada	
Gotejamento	75 a 90
Microaspersão	70 a 85

Fonte: Solomon (1990).

retorno = $1/(1 - \text{probabilidade}) = 1/0,25 = 4$, há risco de a cultura sofrer déficit hídrico nessa fase considerada.

O problema maior de se adotar um valor fixo de ET_c é porque, na realidade, é variável ao longo dos dias. Portanto, pode haver valores menores ou maiores do que o valor fixo, interferindo no manejo de irrigação. A probabilidade de 75% é usada para fins de projeto, mas para fins de manejo não é muito adequada.



Exemplo de cálculo de frequência de irrigação variável por fase de cultura

Outra questão é que apesar da grande simplicidade e comodidade da frequência de irrigação fixa, essa é estabelecida dentro de uma situação crítica da cultura.

Então, inevitavelmente, haverá muita perda de água por percolação, haja vista que as fases de desenvolvimento vegetativo e de maturação não são períodos críticos de demanda hídrica, além de nem sempre uma cultura ser plantada em período de máxima demanda evaporativa. Para atenuar o problema, sugere-se que se adotem frequências fixas somente nos períodos do mesmo estágio do ciclo fenológico, conforme a metodologia para determinação do K_c do ma-

nual FAO-24 (Doorenbos; Pruitt, 1977). Segundo essa metodologia, o ciclo é geralmente dividido em quatro estádios, de tal modo que se poderia também obter quatro frequências diferentes de irrigação, de acordo com essas fases (ver seção Fases do Ciclo de Culturas Anuais). Os valores de K_c poderiam servir de referência para reduzir os valores da ET_c de projeto.

Medição do potencial ou do conteúdo da água no solo

Instrumentos com sensores que medem o potencial matricial (ψ_m) da água no solo, como tensiômetros e blocos de resistência elétrica, são muito úteis para determinar, indiretamente, com o auxílio da curva de retenção, o conteúdo de água no solo. Instrumentos com sensores que medem diretamente o conteúdo de água no solo, como a sonda de nêutrons e o *time domain reflectometry* (TDR), são mais complexos na utilização e mais caros. O método gravimétrico, apesar de mais confiável e servir como padrão, é laborioso e de longo tempo de resposta.

A metodologia para o manejo de irrigação que será, aqui, discutida é independente do instrumento usado. A única diferença está entre instrumentos que medem o potencial (ou tensão) e o conteúdo de água (umidade) do solo. Os primeiros necessitam da conversão do potencial para conteúdo de água, o que normalmente é feito pela curva de retenção, como está exemplificado pela Figura 1.

De modo geral, a maioria das plantas tem seu crescimento afetado quando o potencial matricial da água no solo atinge valores menores que -0,5 MPa (-500 kPa). Dessa forma, a não ser em períodos específicos, nos quais a cultura exige um estresse de água, nunca se deve permitir que o potencial atinja valores menores que -0,3 MPa (-300 kPa). Esse fato se reforça ainda mais quando se observam com detalhe as curvas de retenção de água de solos (Figura 1). Como o potencial de pressão varia com a umidade do solo (função exponencial ou potencial), a umidade (conteúdo de água) varia muito

pouco quando o potencial passa de -0,5 MPa a -1,5 MPa (-500 kPa a -1.500 kPa).

Quando se deseja ser mais preciso, cada cultura tem um intervalo ótimo de potenciais da água, para cada estágio de desenvolvimento. A execução, na prática, de uma irrigação que

Tabela 6. Potencial matricial (kPa) no qual a água deve ser aplicada, para diferentes culturas, para solos fertilizados e manejados para máxima produção.

Cultura ⁽¹⁾	Potencial matricial (kPa)
Alfafa	-150
Café	⁽³⁾
Cana-de-açúcar	-100 a -200
Citros	-20 a -100
Feijão	-75 a -200
Milho (fase vegetativa)	-50
Milho (maturação)	-800 a -1.200
Tomate	-80 a -150
Uva (no início)	-40 a -50
Uva (na maturação)	-100
Hortaliça ⁽²⁾	
Aipo	-20 a -30
Alface	-40 a -60
Alface (semente)	-80
Alho	-40 a -50
Batata	-30 a -50
Brócolis (crescimento)	-45 a -50
Brócolis	-60 a -70
Cebola	-45 a -65
Cebola (semente)	-150
Cenoura	-30
Cenoura (semente)	-400 a -600
Ervilha	-30 a -50
Melão	-30 a -80
Milho-doce	-50 a -100
Morango	-20 a -30
Pepino	-100 a -300
Repolho	-60 a -70
Tomate	-30 a -200
Vagem	-40 a -80

Fontes: ⁽¹⁾ Reichardt (1987) e ⁽²⁾ Marouelli et al. (1986). ⁽³⁾ Requer períodos de potencial baixo, para quebrar dormência, seguidos de período de alto potencial.

atenderia a um critério rígido desse é, porém, muito difícil. Isso depende muito do sistema de irrigação empregado.

Para as regiões temperadas, já existem dados experimentais para muitas culturas. Na Tabela 6, são apresentados alguns desses valores, incluindo-se também alguns dados para hortaliças.

Como se pode notar, a partir dos dados da Tabela 6, os potenciais ótimos para a maioria das culturas são maiores que -80 kPa (-0,08 MPa), o que faz com que o tensiômetro se torne um instrumento bastante útil no controle da irrigação.

Para uma área a ser tratada como uma unidade de irrigação, deve-se medir o potencial ou o conteúdo da água do solo. As medidas devem ser feitas em pelo menos três a quatro pontos representativos da área e, no mínimo, a duas profundidades, uma na zona de máxima atividade radicular e outra nas proximidades da parte inferior da zona radicular, como está indicado na Figura 4. As medidas no ponto A, dentro da zona radicular ativa, são as que devem ser utilizadas para o critério de estabelecimento da época de irrigação. As medidas no ponto B, no limite da zona radicular, servem como medidas complementares para que se tenha um controle sobre o movimento da água no solo durante

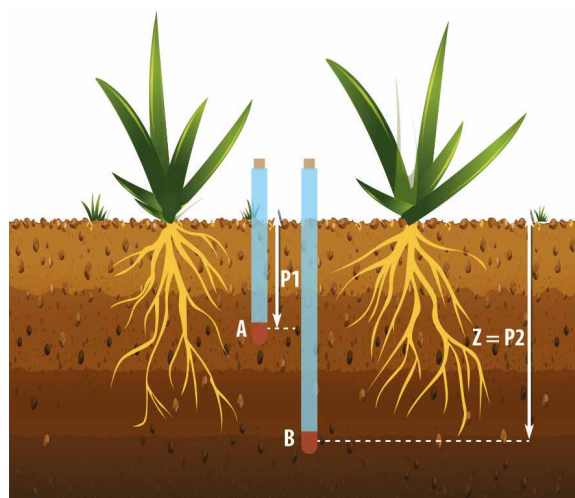


Figura 4. Posição dos instrumentos de medição do potencial ou do conteúdo de água no solo próximo às plantas e profundidades de instalação.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

a extração de água pela cultura, e mesmo durante os processos de irrigação (infiltração) e redistribuição da água no perfil.

Um procedimento conveniente é traçar um gráfico do potencial matricial (ψ_m) ou do conteúdo de água no solo (θ) como uma função do tempo e da profundidade do solo (Z), durante o desenvolvimento da cultura a ser eventualmente irrigada, como indica a Figura 5. A vantagem de fazer o gráfico está na possibilidade de extrapolar a curva do potencial matricial para os dias futuros e, razoavelmente, prever com antecedência de 3 a 5 dias a época de irrigação.

Convém salientar que, controlando-se a irrigação por meio de instrumentos, a época de irrigar fica completamente independente do estabelecimento prévio de frequências de irrigação. Contudo, deve-se acompanhar o desenvolvimento do sistema radicular, para determinar a zona ativa das raízes (Z) e considerar a leitura do potencial, ou do conteúdo de água, feita no ponto médio dessa profundidade como a indicadora de quando irrigar.

Usando-se esse método como manejo de irrigação, a LL é dada por:

$$LL = [(CC - U_i)/10] \times d \times Z \quad (5)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação (mm); CC é a capacidade de campo (%peso); U_i é o conteúdo de água no solo, considerado como o limite para início da irrigação (%peso); d é a densidade do solo (g cm^{-3}); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

Observa-se que a Equação 5 é semelhante às Equações 1 e 2, em conjunto. A diferença está no fator de disponibilidade f que não aparece na Equação 5, porque esse fator já está implícito ao se estabelecer um limite mínimo no conteúdo de água no solo para reinício da irrigação (U_i). Entretanto, quando se utilizam instrumentos com sensores que medem o potencial matricial (como o tensiômetro), é necessário converter o seu valor para conteúdo de água (umidade) do solo, por meio da curva de retenção. Nesse caso, os valores de U_i podem ser obtidos pela

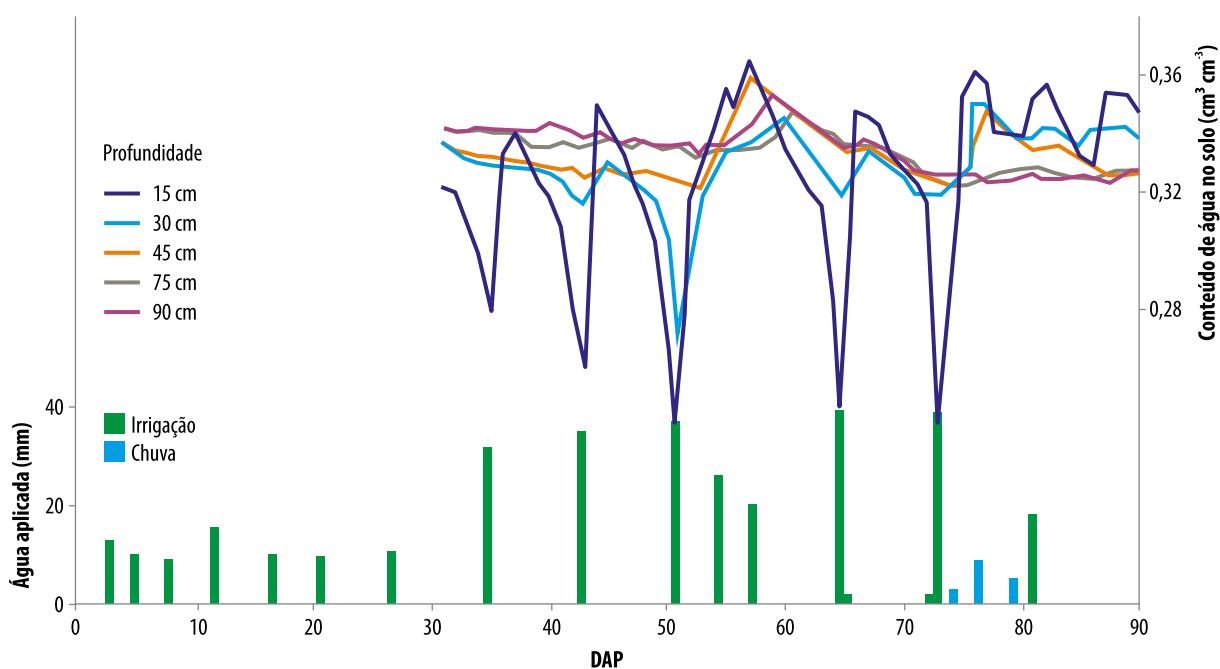


Figura 5. Conteúdo de água no solo, por profundidade de solo, e água aplicada (irrigação e chuva), em relação aos dias após o plantio (DAP), em cultura de feijão irrigada com frequência de 8 dias.

Fonte: Albuquerque (1997).

conversão dos valores de ψ_m mostrados nas tabelas das páginas 271 e 273, pela curva de retenção do solo específico da localidade.

Da mesma forma, como visto anteriormente, a LB pode ser obtida pela Equação 3.

Há outro modo de estimar a LL , quando se utilizam instrumentos com sensores instalados em diversas profundidades do solo. Desse modo, pode-se traçar o perfil de extração de água pelo solo, sem necessidade de

estimar a profundidade efetiva do sistema radicular (Z), melhorando a precisão na estimativa da lâmina de irrigação. Essa metodologia é simples, apesar de um pouco laboriosa, é apresentada por Reichardt (1987) e foi utilizada por Albuquerque (1997) em cultura de feijão (Figura 6).



Exemplo de cálculo de água no solo por meio de instrumentos

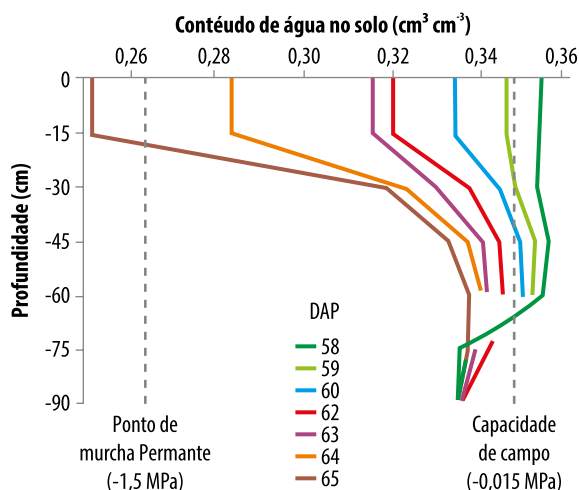


Figura 6. Conteúdo de água no solo, em vários dias após o plantio (DAP), em cultura de feijão, submetida à frequência de irrigação de 8 dias.

Fonte: Albuquerque (1997).

Medição ou estimativa da evapotranspiração da cultura

A partir de medições ou estimativas da ET_c , em períodos diários, semanais, decendiais, etc., é possível programar a irrigação da cultura.

Como relatado em outro capítulo, medições diretas da evapotranspiração de referência (E_{To}) ou mesmo da ET_c são de uso muito limitado, geralmente se restringindo ao uso em pesquisa. Para as estimativas da ET_c , os métodos empíricos ou semiempíricos são os mais utilizados, principalmente os métodos Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Radiação e Penman, em razão das suas menores necessidades de obtenção de parâmetros meteorológicos.

O Tanque Classe A (Figura 7) é muito utilizado para a estimativa da E_{To} . Esse baseia em medições diretas da evaporação da água e, a partir daí, com o coeficiente de tanque (K_p), fazem-se as estimativas da evapotranspiração de referência (E_{To}). Com o coeficiente de cultura (K_c), estima-se a ET_c .

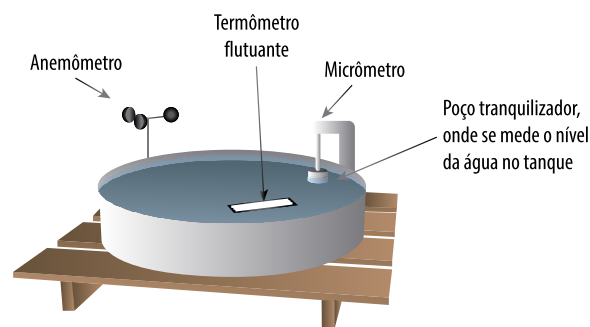


Figura 7. Tanque Classe A.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Será apresentada aqui a metodologia para se fazer o manejo de irrigação, quando se obtém a E_{To} medida ou estimada diariamente por qualquer um dos métodos citados anteriormente. Obviamente, a E_{To} estimada pela evaporação da água do Tanque Classe A instalado próximo à área da cultura torna essa forma de manejo muito mais simples (ver capítulo Requerimento de Água de Culturas).

Para realizar a irrigação da cultura, quando se têm dados diários da ET_c , a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\sum_{i=1}^n (ET_c)_i \approx CAD \times f \times Z \quad (6)$$

em que $(ETc)_i$ é a evapotranspiração da cultura no dia i (mm dia^{-1}); i é o dia da obtenção da ETc ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); n é o número total de dias necessários para satisfazer a condição da equação, ou seja, é a frequência de irrigação (dias); CAD é a capacidade de água total disponível no solo (mm cm^{-1}); f é o fator de disponibilidade ($0 < f < 1$); e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

A incógnita da Equação 6 é o termo n , que é a frequência de irrigação procurada. Logicamente, quando o somatório da ETc estiver próximo de igualar ou ultrapassar ligeiramente o valor do segundo membro da Equação 6, deve-se proceder a irrigação. Assim, a LL é obtida do primeiro membro da Equação 6, ou seja:

$$LL = \sum_{i=1}^n (ETc)_i \quad (7)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação (mm).

Na ocorrência de precipitação, deve-se subtrair a sua porção efetiva da ETc na Equação 7.

Da mesma forma que descrito na seção Frequência de Irrigação Fixa, a LB pode ser obtida pela Equação 3.

Uma forma prática e fácil de operacionalizar esse método é fazer um balanço da água no solo, por meio de planilhas de cálculos ou de programas específicos de informática. Alguns desses serão comentados posteriormente.

Uso combinado de variáveis do solo e do clima

As seções Medição do Potencial ou do Conteúdo da Água no Solo e Medição ou Estimativa da Evapotranspiração da Cultura referem-se a métodos de manejo da irrigação que usam variáveis do solo e do clima, respectivamente. Uma combinação entre ambos pode ser feita visando à programação da irrigação.

A utilização de instrumentos que monitoram o potencial matricial ou o conteúdo de água no solo (tensiômetros, blocos de resistência elétri-

ca, sonda de nêutrons, etc.) pode ser útil para verificar o momento de irrigar a cultura, por meio de um valor preestabelecido do potencial ou do conteúdo de água no solo para efetuar a irrigação. Do mesmo modo como descrito na seção Medição do Potencial ou do Conteúdo da Água no Solo, podem-se usar as tabelas das páginas 271 e 273 como referência para estipular esse valor. Assim, a frequência de irrigação é encontrada.

Variáveis do clima, que estão relacionadas à obtenção da ETc , fornecerão a quantidade de água a aplicar, que é a lâmina líquida de irrigação (LL) constante na Equação 7. O valor de n da Equação 7, nesse caso, é a frequência de irrigação (F) encontrada com o instrumento de monitoramento do solo.

Da mesma forma relatada na seção Frequência de Irrigação Fixa, a LB pode ser obtida pela Equação 3.

Balanço diário da água no solo

Tendo-se conhecido alguns dos métodos de manejo de irrigação, pode-se realizar o balanço da água no solo diariamente (Figura 8). Esse balanço é feito à semelhança de uma conta ban-



Exemplo de cálculo de ETc diária

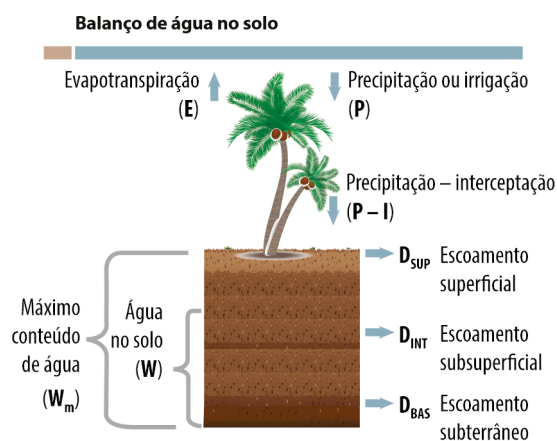


Figura 8. Balanço da água no solo.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

cária, em que os depósitos são feitos através da irrigação ou chuva, e as retiradas através da ETc . Entretanto, o tamanho dessa conta é limitado, pois o sistema radicular ocupa um volume limitado do solo, e este tem uma capacidade de armazenamento também limitada, conforme já visto.

O critério do manejo de irrigação, apresentado na seção Medição ou Estimativa da Evapotranspiração da Cultura, é mais fácil de ser operacionalizado através do balanço hídrico diário, em que se utiliza uma tabela ou planilha para avaliar, diariamente, os valores do consumo de água, precipitações, variações no armazenamento de água no solo e irrigações.

Nesse balanço, são desprezados os volumes de água escoados superficialmente no solo, de água interceptada pela planta, de água perdida por percolação profunda no solo e adicionada ao sistema radicular por ascensão capilar. Quando a irrigação é bem efetuada, na condição ótima, em que não há excesso nem deficit, não existem ou, na pior das hipóteses, são minimizadas as perdas de água escoada pela superfície do solo e por percolação. A perda por interceptação e o ganho de água por ascensão capilar, nesse caso, são considerados desprezíveis.



A título de exemplo de programas disponíveis para fazer o manejo de irrigação, há planilhas eletrônicas que utilizam também o balanço da água no solo, segundo descrevem Albuquerque e Andrade (2001), Albuquerque (2003, 2007), Albuquerque et al. (2013, 2014).

Atualmente, com o avanço da informática, está cada vez mais fácil utilizar ferramentas como as planilhas eletrônicas e programas específicos que calculam o balanço hídrico diário. Há alguns softwares disponíveis, como o *Cropwat*, do manual FAO-46 (Smith, 1993), Saaci (Moreira, 1992; Moreira; Torres Filho, 1993), entre outros.

Seleção do coeficiente de cultura

Parte desse tópico já foi comentada anteriormente, porém neste capítulo será discutida a metodologia usada para a estimativa do Kc , segundo os manuais 24 (Doorenbos; Pruitt, 1977) e 56 (Allen et al., 1998) da FAO, adaptados por Albuquerque e Andrade (2001) e Albuquerque e Guimarães (2004).

A ETc é a soma da transpiração da cultura e a evaporação da água da superfície do solo. A partir da cobertura completa do solo pela cultura, a evaporação torna-se desprezível, de modo que somente no período do plantio e no início do crescimento vegetativo a evaporação do solo é considerável, particularmente se a sua superfície estiver úmida em decorrência de irrigações e chuvas frequentes.

Transpiração e evaporação são regidas por diferentes processos físicos. No entanto, mesmo no período de crescimento vegetativo, a evaporação do solo forma parte da ETc , e, para efeito de simplicidade, o coeficiente que relaciona ETo com a evaporação do solo é apresentado pelo coeficiente de cultura (Kc), o qual também exprime o efeito das características da cultura sobre a sua necessidade de água.

Os valores de Kc relacionam a evapotranspiração da cultura livre de doenças e pragas e da competição com plantas invasoras, que se desenvolvem num campo de tamanho relativamente extenso, sob condições ótimas de água e de fertilidade no solo, e que pode atingir o pleno potencial de produção (evapotranspiração máxima). Portanto, a relação entre ETc e ETo se expressa por:

$$ETc = Kc \times ETo \quad (8)$$

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

Os procedimentos para selecionar os valores apropriados de K_c serão mostrados a seguir, os quais são influenciados pelas características da cultura, época de plantio ou semeadura, estágio de desenvolvimento da cultura e condições gerais de clima.

O efeito das características da cultura sobre a relação entre ET_c e ET_o é mostrado na Figura 9. A grande variação entre os grupos de cultura é em razão da resistência à transpiração de diferentes tipos de plantas, tais como as que mantêm os estômatos fechados durante o dia (abacaxi) e com folhas cerosas (citros). Também diferenças na altura, rugosidade da cultura, reflexão e cobertura do solo produzem a variação ilustrada na relação ET_c/ET_o .

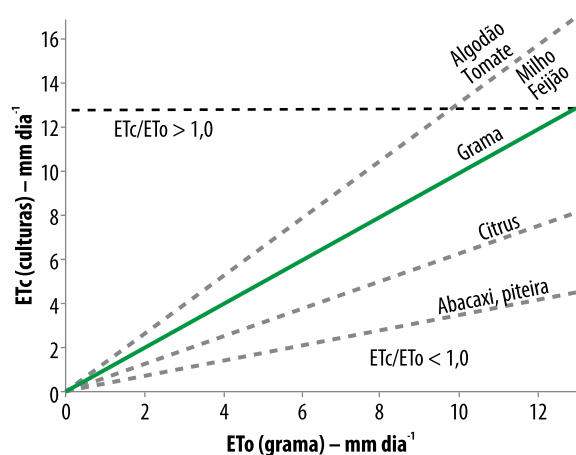


Figura 9. Evapotranspiração da cultura (ET_c) comparada com a evapotranspiração de referência (ET_o).

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

Para condições de evaporação elevada, isto é, clima quente, ventos fortes e baixa umidade do ar, os valores de ET_o podem alcançar de 12 mm dia^{-1} a 14 mm dia^{-1} , e valores de ET_c de 15 mm dia^{-1} a 17 mm dia^{-1} podem ser reais, particularmente para culturas baixas em regiões áridas que são fortemente afetadas por ventos e ar seco (Doorenbos; Pruitt, 1977; Allen et al., 1998).

Fases do ciclo de culturas anuais

A época de plantio afetará a duração do ciclo de desenvolvimento e a taxa de crescimento

da cultura. Por exemplo, dependendo do clima, a beterraba pode ser semeada no outono, na primavera ou no verão, perfazendo um ciclo total de 230, 200 e 160 dias, respectivamente. O ciclo da soja varia de 100 dias, em regiões de clima quente e de baixa latitude, a 190 dias, em 2.500 m de altitude na África Equatorial; e o ciclo do milho, de 80 a 240 dias (Allen et al., 1998).

De acordo com o método da FAO para a estimativa de valores K_c (Doorenbos; Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), a cultura de ciclo anual é dividida em quatro fases do ciclo fenológico, conforme a Figura 10. Nessa figura, estão evidenciadas a fase 1, que corresponde ao estágio inicial até o início do desenvolvimento vegetativo pleno ($K_{c_{ini}}$), e a fase 3, que corresponde ao estágio de florescimento até o início do enchimento de grãos ($K_{c_{med}}$), cujos valores normalmente são os máximos apresentados para o K_c .

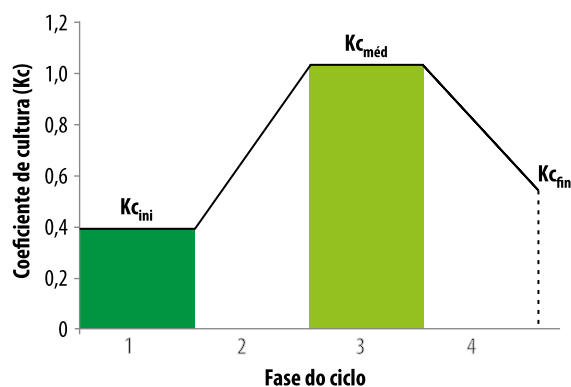


Figura 10. Evolução do coeficiente de cultura (K_c) ao longo do ciclo fenológico de culturas de ciclo anual, evidenciando-se as fases 1 ou inicial ($K_{c_{ini}}$) e 3 ou de florescimento ($K_{c_{med}}$).

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998).

As quatro fases ou estádios do ciclo de desenvolvimento são descritas como:

- 1) **Estádio inicial (fase 1)** – Corresponde ao início do crescimento da cultura, quando a superfície do solo não está completamente coberta pela cultura (cobertura do solo < 10%).

- 2) **Estádio de desenvolvimento vegetativo (fase 2)** – Corresponde de 10% a 80% de cobertura do solo.
- 3) **Estádio de florescimento ou reprodutivo (fase 3)** – Corresponde ao início da cobertura plena do solo (início do florescimento) até o início da maturação, que é indicada pela descoloração ou queda das folhas.
- 4) **Estádio de maturação (fase 4)** – Corresponde ao início da descoloração (ou queda) das folhas até a plena maturação ou ponto de colheita.

Como referência, a faixa de duração total do ciclo de algumas culturas anuais e o percentual de duração para cada uma das quatro fases estão mostradas na Tabela 7, a qual foi gerada a partir da adaptação de dados médios obtidos em diferentes localidades, segundo Doorenbos e Pruitt (1977).

Como exemplo para uso da Tabela 7, tem-se: uma cultura com duração total de 120 dias, dos quais 20% de duração são para a fase 1; 35%, para a fase 2; 25%, para a fase 3; e 20%, para a fase 4, o que corresponde, respectivamente, a uma duração de 24, 42, 30 e 24 dias. Isso significa que a fase 1 inicia com 0% e termina com 20% – 0 a 24 dias – do ciclo total; a fase 2 inicia com 20% e termina com 55% – 25 a 66 dias – do ciclo total; a fase 3 inicia com 55% e termina com 80% – 67 a 96 dias – do ciclo total; e a fase 4 inicia com 80% e termina com 100% – 97 a 120 dias – do ciclo total.

Coeficiente de cultura para culturas de ciclo anual em condição padrão

Na Tabela 8, estão listados valores típicos de K_c em três fases do ciclo de desenvolvimento das culturas, de acordo com o esquema apresentado na Figura 10 ($K_{c_{ini}}$, $K_{c_{méd}}$ e $K_{c_{fin}}$). Os coeficientes integram os efeitos tanto da transpiração quanto da evaporação no tempo ao longo do ciclo. Os efeitos da integração no tempo representam uma frequência média de ume-

Tabela 7. Faixas de duração total do ciclo (em dias) e duração de cada uma das quatro fases (em percentagem do total) de algumas culturas de ciclo curto, segundo dados obtidos e adaptados de algumas regiões do mundo.

Cultura	Duração total do ciclo (dias)	Percentual de duração de cada uma das 4 fases ⁽¹⁾ (1 – 2 – 3 – 4)
Alface	75 a 140	(27-37-26-10)
Algodão	180 a 195	(16-27-31-26)
Amendoim	130 a 140	(22-26-34-18)
Batata	105 a 145	(21-25-33-21)
Berinjela	130 a 140	(22-32-30-16)
Beterraba	70 a 90	(25-35-28-12)
Cebola (seca)	150 a 210	(10-17-49-24)
Cebola (verde)	70 a 95	(28-45-18-9)
Cenoura	100 a 150	(19-27-39-15)
Crucíferas ⁽²⁾	80 a 95	(26-37-25-12)
Feijão-vagem	75 a 90	(21-34-33-12)
Feijão seco	95 a 110	(16-25-40-19)
Girassol	125 a 130	(17-27-36-20)
Melão	120 a 160	(20-28-37-15)
Milho-doce	80 a 110	(23-29-37-11)
Milho (grãos)	125 a 180	(17-28-33-22)
Pepino	105 a 130	(19-28-38-15)
Rabanete	35 a 40	(20-27-40-13)
Tomate	135 a 180	(21-28-33-18)
Trigo	120 a 150	(13-20-43-24)

⁽¹⁾ Percentual de duração em relação ao tempo de duração total.

⁽²⁾ Repolho, couve-flor, brócolis, etc.

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

decimento para cultura padrão, sob condições típicas de desenvolvimento numa área irrigada.

Os valores para o $K_{c_{méd}}$ e $K_{c_{fin}}$ da Tabela 8 são apresentados, para a condição de clima subúmido, com umidade relativa mínima (UR_{min}), média diária de cerca de 45%, e com velocidades médias de vento (medidas a 2 m da superfície – u_2) moderado em torno de 2 m s⁻¹.

Coeficiente de cultura da fase inicial

No período específico da semeadura ou do plantio e durante o estágio seguinte de cres-

Tabela 8. Coeficientes de cultura único (K_c) e alturas máximas médias de plantas, para cultivos sob condição padrão (culturas bem manejadas, não estressadas, em clima subúmido (umidade relativa mínima diária = 45% e velocidade do vento a 2 m da superfície = 2 m s^{-1}).

Cultura	$K_{c_{ini}}$	$K_{c_{méd}}$	$K_{c_{fin}}$	Altura máxima da cultura (m)
Leguminosas	0,40	1,15	0,55	
Amendoim		1,15	0,60	0,4
Ervilha		1,15 ⁽²⁾	1,10–0,30 ⁽¹⁾	0,5
Feijão	0,40	1,05–1,15 ⁽¹⁾	0,90–0,35 ⁽¹⁾	0,4
Feijão Caupi		1,05	0,60–0,35 ⁽¹⁾	0,4
Grão-de-bico		1,00	0,35	0,4
Lentilha		1,10	0,30	0,5
Soja		1,15	0,50	0,5–1,0
Fibras	0,35			
Algodão		1,15–1,20	0,70–0,50	1,2–1,5
Oleaginosas	0,35	1,15	0,35	
Canola		1,00–1,15 ⁽³⁾	0,35	0,6
Girassol		1,00–1,15 ⁽³⁾	0,35	2,0
Mamona		1,15	0,55	2,0
Cereais	0,30	1,15	0,40	
Arroz	1,05	1,20	0,90–0,60	1,0
Aveia		1,15	0,25	1,0
Cevada		1,15	0,25	1,0
Milheto		1,00	0,30	1,5
Milho		1,20	0,60–0,35 ⁽⁴⁾	2,0
Sorgo		1,00–1,10	0,55	1,0–2,0
Trigo		1,15	0,25–0,40 ⁽⁵⁾	1,0
Cana-de-açúcar	0,40	1,25	0,75	3,0

$K_{c_{ini}}$, $K_{c_{méd}}$ e $K_{c_{fin}}$: coeficientes de cultura da fase inicial, reprodutiva e de maturação, respectivamente.

⁽¹⁾ O primeiro valor é para colheita fresca e o segundo para colheita de grãos secos. ⁽²⁾ Algumas vezes são utilizadas estacas com 1,5 m a 2,0 m de altura, assim o valor de $K_{c_{méd}}$ pode atingir 1,20. ⁽³⁾ Os valores mais baixos referem-se a condições chuvosas com menor densidade populacional. ⁽⁴⁾ O primeiro valor para $K_{c_{fin}}$ é para colheita com alta umidade nos grãos. O segundo valor para $K_{c_{fin}}$ é para cultura colhida após o grão estar seco (cerca de 18% de umidade à base de peso úmido). ⁽⁵⁾ O valor mais alto é para colheita manual.

Fonte: Allen et al. (1998).

cimento vegetativo, a frequência de chuva ou irrigação (F) é um parâmetro que influencia muito o K_c nessa fase ($K_{c_{ini}}$). Também o tipo de preparo de solo (convencional ou plantio direto) pode interferir nesse coeficiente. É sabido que a palhada (restos culturais provenientes da cultura antecessora num sistema de plantio direto), mantida sobre o solo, pode reduzir a evaporação na fase inicial do ciclo da cultura e

também diminuir o valor do $K_{c_{ini}}$ para um patamar de até 50%. Portanto, refinamentos dos valores usados para o $K_{c_{ini}}$ deveriam ser sempre utilizados. Para umedecimentos frequentes, tais como irrigação por aspersão ou chuva de alta frequência, os valores do $K_{c_{ini}}$ podem aumentar significativamente.

Também a demanda evaporativa da atmosfera, ou seja, a intensidade da ET_o , pode afetar sig-

nificativamente o Kc_{ini} . Demanda mais elevada fará com que o solo seque mais rápido entre eventos de aplicação de água, e o valor do Kc_{ini} será menor num determinado período.

Para facilitar a escolha do valor de Kc_{ini} , pode-se contar com o auxílio da seguinte equação, de acordo com a ET_0 e com a frequência de irrigação (F) escolhida para essa fase (Albuquerque; Andrade, 2001):

$$Kc_{ini} = 1,41704 - 0,092412ET_0 - 0,11001F + \\ + 0,0042672ET_0^2 + 0,0033743F^2 + \\ + 0,00028724 ET_0 F \quad (9)$$

em que Kc_{ini} é o coeficiente de cultura para a fase 1 do ciclo vegetativo de qualquer cultura de ciclo curto; ET_0 é a evapotranspiração de referência reinante na época da fase 1 ($1 \text{ mm dia}^{-1} \leq ET_0 \leq 10 \text{ mm dia}^{-1}$); e F é a frequência de irrigação na fase 1 ($1 \text{ dia} \leq TI \leq 20 \text{ dias}$).

A Equação 9 foi gerada pelo ajuste realizado por Albuquerque e Andrade (2001) nas curvas apresentadas de $Kc \times ET_0 \times F$ por Doorenbos e Pruitt (1977), para a estimativa dos valores de Kc para qualquer cultura de ciclo curto na fase 1 do seu ciclo de desenvolvimento.

Coeficientes de cultura da fase reprodutiva e de maturação

O valor do coeficiente de cultura relativo à fase de florescimento ou reprodutiva (Kc_{med}) se refere à fase 3 e, na data de maturação, se refere a um valor pontual no fim da fase 4 (Kc_{fin}), conforme esquema da Figura 10.

Os efeitos da diferença das propriedades aerodinâmicas entre a grama como cultura de referência e as culturas agrícolas não são apenas intrínsecos à planta em si, mas também variam com as condições climáticas e a altura da cultura. Climas mais áridos e condições de velocidades de vento maiores originarão valo-

res maiores para o Kc_{med} ou Kc_{fin} , ao passo que em climas mais úmidos e condições de vento mais baixas os valores serão menores.

Segundo Allen et al. (1998), para fazer ajustes ao Kc_{med} e Kc_{fin} apresentados na Tabela 8, quando a UR_{min} for diferente de 45% ou a velocidade do vento (u_2) for maior ou menor do que 2 m s^{-1} , é necessária a seguinte equação:

$$Kc = Kc(tab) + [0,04(u_2 - 2) - \\ - 0,004(UR_{min} - 45)](h/3)^{0,3} \quad (10)$$

em que $Kc = Kc_{med}$ ou Kc_{fin} (adimensional); $Kc(tab)$ é o valor do Kc_{med} ou Kc_{fin} apresentados na Tabela 8; u_2 é o valor médio da velocidade do vento diário a 2 m da superfície (m s^{-1}), durante a fase 3 (para Kc_{med}) ou a 4 (para Kc_{fin}); UR_{min} é o valor médio da umidade relativa mínima diária (%) durante a fase 3 (para Kc_{med}) ou a 4 (para Kc_{fin}); e h é a altura média da planta (m) durante a fase 3 (para Kc_{med}) ou a 4 (para Kc_{fin}).

Os valores de Kc determinados com a Equação 10 são ajustes médios para a fase reprodutiva (Kc_{med}) e de maturação (Kc_{fin}). Os valores para as variáveis u_2 e UR_{min} devem ser tomados como valores médios para aqueles períodos. Também os limites impostos para ambas as variáveis e h devem ser observados.

No caso de Kc_{fin} , a Equação 10 deve ser aplicada somente quando os valores tabulados do Kc excederem 0,45. A equação reduz o valor do Kc_{fin} com o aumento da UR_{min} . Essa redução é característica de culturas que são colhidas verdes, ou antes que se tornem completamente secas (ou seja, $Kc_{fin} > 0,45$). Nenhum ajuste é necessário quando $Kc_{fin}(tab) < 0,45$ (isto é, $Kc_{fin} = Kc_{fin}(tab)$). Quando as culturas são deixadas senescendo e secando no campo (como evidenciado por $Kc_{fin} < 0,45$), u_2 e UR_{min} têm menos efeito sobre o Kc_{fin} , e o ajuste é desnecessário.

Passos para obtenção da curva do coeficiente de cultura

Somente três valores do coeficiente de cultura são necessários para descrever e construir a curva do K_c , segundo esquema mostrado na Figura 10. Esses valores correspondem ao $K_{c_{ini}}$, $K_{c_{med}}$ e $K_{c_{fin}}$.

Os passos necessários para obter os diferentes valores de K_c nos estádios são dados a seguir (referência):

- 1) Estabelecer a data de plantio (ou semeadura) e informações locais do clima ou de regiões próximas de condições similares.
- 2) Determinar a duração total do ciclo de desenvolvimento e a duração de cada fase a partir de informações locais (como referência, verificar a Tabela 7).
- 3) Estádio inicial (fase 1): prever a frequência de irrigação ou de chuva; para um valor predeterminado de ETo , obter o $K_{c_{ini}}$ oriundo da Equação 9 e plotar o seu valor como está representado na Figura 10.
- 4) Estádio de desenvolvimento vegetativo (fase 2): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de $K_{c_{med}}$ pela Equação 10 e Tabela 8, para a fase 3, e plotá-lo para a fase 2 como uma linha reta entre o valor da fase 1 ($K_{c_{ini}}$) e o da fase 3 ($K_{c_{med}}$).
- 5) Estádio reprodutivo (fase 3): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de $K_{c_{med}}$ conforme o item anterior e assumi-lo como uma linha reta (valor constante) até o início da fase 4.

- 6) Estádio de maturação (fase 4): também obter o $K_{c_{fin}}$ (valor pontual) pela Equação 10 e Tabela 8 e plotá-lo como o último valor do ciclo (maturação completa ou ponto de colheita) e ligar esse valor com uma linha reta até o final da fase 3 (Figura 10).

Coeficientes de cultura para culturas perenes

Os valores de K_c para a cultura da banana são apresentados na Tabela 9 para regiões tropicais. Os valores menores do K_c , após o décimo mês, refletem o rápido declínio da área foliar ativa da planta-mãe. Os baixos valores no período inicial se aplicam onde houver muita cobertura morta no solo, enquanto, se a cultura estiver em solo nu e em regiões de chuvas frequentes, os valores de K_c podem ser de 0,8 a 1,0, e a Equação 9 pode ser utilizada.

Os valores de K_c para citros incluem diferentes coberturas de solo, sendo em solo limpo ou sem controle de plantas daninhas (Tabela 10). Esses mesmos valores têm sido utilizados para a cultura da manga.

O efeito de ventos mais fortes é desprezado, tendo em vista que citros têm bom controle de transpiração. Esse controle ou resistência estomática varia com a umidade relativa e temperatura do ar, ou seja, alta resistência sob condições quente e seca e baixa resistência sob condições mais úmida e fria. No entanto, os valores apresentados na Tabela 10 necessitam de um acréscimo de 15% a 20% durante a estação de verão em climas mais úmidos e frios.

Em pomares mais jovens, com baixa porcentagem de árvores cobrindo o solo, os valores de K_c são assumidos de 20% a 50% mais baixos

Tabela 9. Valores do coeficiente de cultura (K_c) para a banana cultivada em clima tropical.

Meses após o plantio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
K_c	0,40	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,85	1,00	1,10	1,10	0,90	0,80	0,80	0,95	1,05

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

Tabela 10. Valores do coeficiente de cultura (K_c) para citros e manga cultivados no hemisfério sul, cujo cultivo seja em regiões predominantemente secas com vento fraco a moderado.

Condição	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Pomar adulto com aproximadamente 70% de cobertura												
Cultivo limpo	0,65	0,65	0,65	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65
Sem controle ⁽¹⁾	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,90	0,90	0,85	0,85	0,85	0,85
Pomar jovem com aproximadamente 50% de cobertura												
Cultivo limpo	0,55	0,55	0,55	0,55	0,60	0,60	0,65	0,65	0,60	0,60	0,60	0,55
Sem controle ⁽¹⁾	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,90	0,90	0,85	0,85	0,85	0,85
Pomar jovem com aproximadamente 20% de cobertura												
Cultivo limpo	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,55	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45
Sem controle ⁽¹⁾	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95

⁽¹⁾ Cultivo sem controle de plantas daninhas.

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1977).

em relação à cobertura das árvores adultas. Sob chuva ou irrigações frequentes, os valores para cultivo em solo limpo se aproximam daqueles com nenhum controle de plantas daninhas.

Alguns estudos indicam valores mais elevados do K_c (de 10% a 15%) para culturas de toranja e de limão, quando comparadas com outros citros.

Os valores de K_c para a cultura da uva podem variar consideravelmente, em função das práticas culturais, variedades, espaçamento, etc. As plantas cultivadas normalmente em solo limpo utilizam menos água do que qualquer outra cultura em razão das suas práticas cultu-

rais, resultando em apenas 30% a 50% de cobertura do solo. Também há um maior controle da transpiração pelos estômatos, em comparação com outras culturas.

Na Tabela 11, estão os valores de K_c para cultivo em clima quente e seco, em solo limpo. Os valores deverão ser reduzidos se a cobertura do solo for menor do que 35%.

Entretanto, no cultivo dito em latada, que cobre completamente o solo, deverão ser adotados valores diferentes dos apresentados por Doorenbos e Kassam (1979), os quais serão maiores, de acordo com Soares e Costa (1998). Esses autores apresentam valores de K_c na Tabela 11,

Tabela 11. Valores do coeficiente de cultura (K_c) para uva cultivada no hemisfério sul, em região predominantemente quente e seca e cobertura do solo na fase reprodutiva de 30% a 35%, sob cultivo limpo e vento fraco a moderado.

Idade da cultura ⁽¹⁾	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
< 1 ano	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
1 a 2 anos	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,50	0,50

Idade da cultura ⁽²⁾	Fase da cultura				
	Poda/floração	Floração/chumbinho	Desenvolvimento do fruto/maturação	Maturação/colheita	Repouso fenológico
> 2 anos	0,40	0,50 a 0,60	0,70 a 0,85	0,70 a 0,50	0,50
	0 a 25 dias	26 a 40 dias	41 a 100 dias	101 a 120 dias	0 a 60 dias

Fonte: ⁽¹⁾ Doorenbos e Kassam (1979) e ⁽²⁾ Soares e Costa (1998).

para diferentes percentuais de cobertura do solo, em cultivos com mais de 2 anos.

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), o valor de K_c para a cultura do abacaxi varia de 0,4 a 0,5 durante todo o período do ciclo da cultura.

Para a cultura do café, no caso de plantas adultas sem sombreamento, em local limpo (sem plantas daninhas), o K_c pode ser considerado 0,90 para todo o ano. Em cultivo em que há ocorrência de plantas daninhas, esse valor se eleva para 1,05 a 1,10. Por ser cultura de ciclo permanente, muitas vezes são considerados os mesmos valores empregados para citros e manga.

Uso do coeficiente de redução em sistemas localizados

Foi visto pela Equação 8 o cálculo da ET_c que corresponde ao uso consuntivo estimado convencionalmente.

As copas de plantas jovens (que ainda não cobrem completamente o solo) e de culturas com espaçamentos maiores cobrem somente uma porção da área superficial do solo (menor projeção horizontal) e interceptam apenas uma fração da radiação incidente. As estimativas convencionais de requerimento de água de culturas jovens consideram parte da água aplicada que será perdida pelo uso consuntivo não efetivo. Essas perdas podem ser por meio da evaporação da superfície úmida do solo ou da transpiração de vegetação indesejável (plantas invasoras).

A irrigação localizada reduz as perdas por evaporação ao mínimo; portanto, a transpiração da cultura é considerada praticamente a água total consumida. Entretanto, a estimativa do uso consuntivo que assume uma superfície completamente úmida deve ser modificada para efeito de irrigação localizada.

A transpiração de uma cultura sob irrigação localizada é uma função da evapotranspiração

(ET_c) calculada convencionalmente e da dimensão da copa da planta. Deve-se, portanto, ao se calcular as necessidades hídricas das culturas na irrigação localizada, aplicar um coeficiente de redução (K_r) ou coeficiente de cobertura, da seguinte forma:

$$ET_{cL} = K_r \times ET_c \quad (11)$$

em que ET_{cL} é a evapotranspiração da cultura irrigada por sistema localizado (mm dia⁻¹); K_r é o coeficiente de redução para irrigação localizada (adimensional, $K_r \leq 1$); e ET_c é a evapotranspiração da cultura estimada convencionalmente (mm dia⁻¹).

Embora a estimativa mais exata de K_r necessite de uma investigação experimental mais profunda, podem-se utilizar várias equações (Keller; Karmeli, 1974, citados por Vermeiren e Jobling, 1997), e a mais recente é aquela apresentada por Keller e Bliesner (1990):

$$K_r = 0,1 \times \sqrt{C_s} \quad (12)$$

em que K_r é o coeficiente de redução para irrigação localizada (adimensional, $K_r \leq 1$); e C_s é a porcentagem da área superficial do solo coberta (projetada) pelas copas das culturas ao meio-dia solar (%).

A Equação 12 é baseada na observação de que, mesmo que a copa da planta seja muito pequena (por exemplo, $C_s = 1\%$ ou mais), a transpiração mínima da planta sob irrigação localizada será maior que 0,1 ET_c (ou 10% da evapotranspiração da cultura calculada no método convencional). Isso é considerado porque ocorre um efeito oásis (advecção), e alguma vegetação adicional comumente cresce na área umedecida pelos emissores. No entanto, quando as copas da planta se desenvolvem até atingirem a cobertura plena ($C_s = 100\%$), o K_r é igual a 1.

A Tabela 12 apresenta os diferentes valores de K_r que resultam do cálculo da Equação 12, segundo a porcentagem de cobertura do solo.

Tabela 12. Valores de coeficiente de redução (K_r) sobre a evapotranspiração da cultura (ET_c) segundo a Equação 12.

Cobertura do solo (%)	K_r
10	0,32
20	0,45
30	0,55
40	0,63
50	0,71
60	0,77
70	0,84
80	0,89
90	0,95
100	1,00

Pela Figura 11, pode-se demonstrar como se estima a porcentagem de cobertura (C_s). Essa porcentagem é dada por:

$$C_s = (A_c/A_e) \times 100 \quad (13)$$

em que C_s é a porcentagem de cobertura (%); A_c é a área da copa projetada sobre o solo (m^2); e A_e é a área dos espaçamentos entre linhas de plantio e entre plantas (m^2).

A área da copa (A_c) pode ser estimada aproximadamente pela área da elipse:

$$A_c = (\pi \times D_1 \times D_2)/4 \quad (14)$$

em que D_1 é o diâmetro maior da elipse projetada no solo (m); e D_2 é o diâmetro menor da elipse projetada no solo (m).

A área dos espaçamentos (A_e) é:

$$A_e = EL \times EP \quad (15)$$

em que EL é o espaçamento entre linhas de plantio (m); e EP é o espaçamento entre plantas (m).

Substituindo as Equações 14 e 15 na Equação 13, então a C_s fica:

$$C_s = (25\pi \times D_1 \times D_2)/(EL \times EP) \quad (16)$$

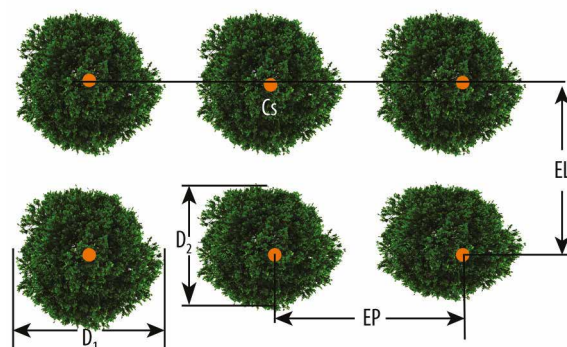


Figura 11. Esquema da projeção horizontal da cobertura da cultura sobre o solo (C_s), sendo EL o espaçamento entre linhas e EP o espaçamento entre plantas. D_1 é o diâmetro maior da projeção da copa no solo e D_2 é o diâmetro menor.

Ilustração: Jasiel Becker Brito Gomes.

Um pomar maduro de cultura perene tem geralmente um valor máximo de C_s igual a 80%, tendo em vista que a copa tem uma projeção circular sobre um espaçamento quadrado, cujos lados são os espaçamentos entre fileiras e plantas, formando uma relação máxima de $\pi/4$ entre a área circular (da projeção da copa, A_c) e a quadrada (dos espaçamentos, A_e).

Alguns técnicos (irrigação, s.d.) fazem uma correção para a área da copa (A_c) em função da relação entre o diâmetro e a altura da planta, conforme está apresentado na Tabela 13. Assim, por exemplo, se uma árvore tem a sua altura duas vezes maior que o diâmetro (relação diâmetro: altura igual a 2), deverá ser multiplicado o fator de 1,08 sobre a área da sua copa (A_c).

Tabela 13. Valores do fator de correção para a área da copa (A_c) da cultura, em função da relação diâmetro: altura das plantas.

Relação diâmetro : altura	Fator de correção ⁽¹⁾
1:1	1,00
1:2	1,08
1:3	1,13
1:4	1,17
1:5	1,20
1:6	1,23

⁽¹⁾ O fator de correção é multiplicado pela área da copa (A_c).

Uso do coeficiente de estresse para condição de evapotranspiração da cultura fora do padrão

A ET_c em condição padrão se refere à cultura em pleno desenvolvimento sem nenhum fator limitante interferindo sobre ela. Esses fatores limitantes principais podem ser deficiência nutricional ou hídrica, ataques de doenças e pragas e competição com plantas invasoras.

A ET_c fora do padrão é também denominada de evapotranspiração real (ET_r), embora a ET_r possa em determinados momentos se igualar à condição padrão, ou seja, $ET_r = ET_c$. Portanto, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura pode ser que a $ET_r \leq ET_c$.

A relação entre a ET_r e a ET_c é regida por um fator de estresse (K_s), assim representado:

$$ET_r = K_s \times ET_c \quad (17)$$

em que ET_r é a evapotranspiração real da cultura (mm dia^{-1}); K_s é o coeficiente de estresse (adimensional); e ET_c é a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia^{-1}).

O fator limitante que tem efeito sobre o K_s que será dado enfoque aqui é o que se limita ao conteúdo de água no solo. O K_s é mais afeito à transpiração da planta do que à evaporação da água no solo. Por isso, o K_s varia em função do tipo de cultura, conforme já relatado na Tabela 3, em que se visualiza o efeito do coeficiente ou fator de disponibilidade f sobre as culturas, cujo valor obtido se define a água facilmente disponível (AFD).

O valor de K_s é igual a 1 (interpretando-se aqui que não há estresse hídrico ocorrendo) toda vez que a AFD não seja totalmente consumida, ou seja, não há estresse hídrico (ou deficit de água no solo) perturbando a ET_r de tal forma que, nesse caso, ET_r é igual a ET_c . Todavia, toda

vez que a AFD seja consumida (e a reserva de água no solo fica além da AFD), o valor de K_s é menor que 1, e então ET_r é menor que ET_c .

Define-se o termo água não facilmente disponível ($ANFD$) como a capacidade total de água disponível do solo (CAD) subtraída da água facilmente disponível (AFD), e também o termo lâmina de água armazenada no solo (L_{Arm}) que é lâmina de água presente no solo num tempo qualquer. Tudo isso está representado na Figura 12, em que a umidade volumétrica θ_i (que tem relação com o coeficiente de disponibilidade f) indica a umidade crítica no solo que estabelece o momento da irrigação. Esses valores de θ_i relacionam-se com ψ_i (potencial matricial) pela curva de retenção; eles são apresentados na Tabela 6 para algumas culturas.

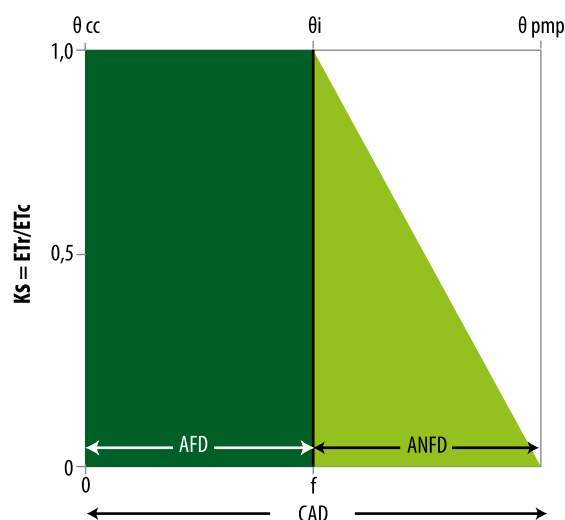


Figura 12. Curva do coeficiente de estresse hídrico (K_s), em função da capacidade total da água disponível no solo (CAD), água facilmente disponível (AFD), coeficiente de disponibilidade (f), água não facilmente disponível ($ANFD$), umidades do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), no ponto de irrigação (θ_i), no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}). ($AFD = f \times CAD$; $K_s = ET_r/ET_c$; evapotranspiração real – ET_r ; evapotranspiração máxima da cultura – ET_c).

Há três situações possíveis para obtenção do valor de K_s :

- Se $L_{Arm} > (CAD - AFD) \rightarrow K_s = 1,0$, ou seja, condição sem estresse;

- Se $L_{Arm} = (CAD - AFD) \rightarrow K_s = 1,0$, que é o ponto crítico correspondente ao θ_i e onde AFD passa para $ANFD$;
- Se $L_{Arm} < (CAD - AFD) \rightarrow K_s < 1,0$, condição de estresse em que a L_{Arm} entra na faixa de $ANFD$.

A partir do momento em que $K_s < 1,0$, a relação do K_s com a CAD e AFD ($= f \times CAD$) do solo pode ser assim definida:

$$K_s = (CAD - L_{Arm}) / (CAD - AFD) \quad (18)$$

em que K_s é o coeficiente de estresse hídrico (adimensional, $0 < K_s \leq 1$); CAD é a capacidade de água total disponível do solo (mm cm^{-1}); L_{Arm} é a lâmina de água armazenada no solo num tempo qualquer que está dentro da CAD (mm água cm^{-1} solo); AFD é a água facilmente disponível no solo ($= f \times CAD$) (mm cm^{-1}); e f é o coeficiente de disponibilidade de água (adimensional, Tabela 3).

Nas boas práticas para o planejamento do manejo da irrigação, deve-se evitar que K_s se torne menor que 1, de modo a não causar restrição hídrica à cultura que possa comprometer a produtividade e/ou a qualidade do produto final.

Irrigação no dia do plantio e nos dias próximos subsequentes

É recomendável que a irrigação do dia do plantio ou da semeadura se faça de modo a umedecer uma profundidade de solo preestabelecida até a capacidade de campo. Essa camada de solo a considerar deverá ser de, no mínimo, a profundidade máxima efetiva do sistema radicular.

Assim, a equação para calcular a lâmina líquida da irrigação de plantio é semelhante à Equação 1 combinada com a Equação 2 e é escrita da seguinte forma:

$$LL(\text{plantio}) = [(CC - U_o)/10] \times d \times Prof \quad (19)$$

em que LL é a lâmina líquida de irrigação a ser aplicada no dia do plantio (mm); CC é a umidade do solo na capacidade de campo (% peso); U_o é a umidade inicial do solo, ou seja, no dia do plantio (% peso); d é a densidade do solo (g cm^{-3}); 10 é a constante necessária para conversão de unidades; e $Prof$ é a profundidade do solo (cm) que se deseja umedecer até a capacidade de campo (CC).

Recomenda-se que $Prof$ seja a profundidade efetiva máxima prevista para o sistema radicular (Z) (cm).

A umidade inicial (U_o) pode ser determinada pelo método gravimétrico por meio de amostra retirada do local até a profundidade $Prof$. Dependendo da condição climática, como, por exemplo, após um período de seca prolongado, o seu valor poderá até ser menor do que o ponto de murcha permanente (PMP).

Considerações sobre o desenvolvimento da cultura logo após o período subsequente ao plantio

Logo após o plantio, a semente ou a muda necessitará de umidade no solo para iniciar o processo de germinação, emergência e de desenvolvimento. A reserva de água no solo necessária à germinação se limita à profundidade de semeadura (Z_o) e um pouco além dela. Portanto, é de fundamental importância manter o solo sempre úmido nesse período de pré-emergência. A grande perda de água pelo solo nesse período é em razão da evaporação pela sua superfície. A prática do plantio direto sobre a palhada da cultura antecessora pode contribuir para manter a superfície mais úmida, por causa de menores perdas por evaporação.

Nos cálculos da lâmina líquida (LL) para a fase 1 do ciclo da cultura, normalmente fixa-se a fre-

quência de irrigação (F). Porém, pode ocorrer que a F fixada não seja a adequada para o desenvolvimento da plântula. Como saber se F fixada arbitrariamente é a mais adequada? Vamos, por meio de um exemplo hipotético, analisar essa questão:

Consideremos um solo com CAD de $1,0 \text{ mm cm}^{-1}$ de solo, coeficiente de disponibilidade (f) de 0,50 e profundidade de semeadura (Z_o) de 5 cm. Se a ETc nessa fase for de 4 mm dia^{-1} e se fixarmos a frequência de irrigação (F) em 2 dias, pode-se calcular a LL por meio da Equação 4 de modo inverso, ou seja:

$$LL = ETc \times F$$

$$LL = 4 \times 2 = 8 \text{ mm}$$

Agora, se usarmos a Equação 1 de modo inverso, para analisarmos o que pode ocorrer com o f ao usarmos LL de 8 mm, então fica:

$$f = LL / (CAD \times Z_o)$$

$$f = 8 / (1 \times 5) = 1,6$$

Com efeito, o coeficiente f não pode ser maior do que 1, o que pressupõe que haverá retirada de água do solo abaixo do PMP , o que causará estresse hídrico à plântula ou prejudicará o processo de germinação.

Analisando de outra forma, se o solo foi irrigado no dia do plantio, estando em sua capacidade máxima de água disponível, a lâmina disponível em 5 cm de profundidade é de $1,0 (\text{mm cm}^{-1}) \times 5 \text{ cm} = 5 \text{ mm}$. Não há como retirar 8 mm por evaporação ou pela plântula se a capacidade do solo é de apenas 5 mm.

Portanto, haverá necessidade de reduzir a F para 1 dia, fazendo assim a $LL = ETc = 4 \text{ mm}$. E o f ficará igual a $4/5 = 0,8$. Ainda não é o ideal, mas não haverá redução de umidade no solo aquém do PMP . Nesse presente caso, para manter o f igual a 0,5, haveria necessidade de F ser menor que 1 dia (em horas), o que, às vezes, é inviável para um manejo prático em condição de campo.

Referências

- ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Evapotranspiração, balanços de energia e da água no solo e índices de estresse hídrico da cultura, em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), submetido a diferentes frequências de irrigação**. 1997. 147 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Planilha eletrônica para a programação de irrigação em pivôs centrais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 9 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 25).
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Planilha eletrônica para programação da irrigação em sistemas de aspersão convencional, pivô central e sulcos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 18 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 97).
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de.; ANDRADE, C. L. T. **Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 14 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 10).
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; GUIMARÃES, D. P. Gestão da água na agricultura: coeficientes de cultivo (K_c) e de tanque classe A (K_p): um exemplo metodológico de estimativa do K_c da cultura do milho e do K_p para o Estado de Minas Gerais. **Item**, v. 63, p. 12-19, 2004.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; COELHO, E. A.; FARIA, C. M. de. **Aplicativo computacional “Irrigafácil” versão 2.1 implementado via web para o manejo de irrigação de algumas culturas anuais no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, 208).
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. **Aplicativo computacional “Irrigafácil” versão 2.0 implementado via web para o manejo de irrigação de algumas culturas anuais em Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 164).
- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; RESENDE, M.; FRANCA, G. E. de; MAGALHÃES, P. C. Efeito da época de suspensão da irrigação na produtividade do milho. In: EMBRAPA. Centro de Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1988-1991**. Sete Lagoas, 1992. p. 29-30.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para cálculo da água disponível baseado na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11-15, 1987.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua en el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Estudio FAO riego y drenaje, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 144 p. (Irrigation and drainage paper, 24).

GRATTAN, S. R.; SNYDER, R. L.; ROBINSON, F. E. Yield threshold soil water depletion. In: GOLDHAMER, D. A.; SNYDER, R. L. (ed.). **Irrigation scheduling: a guide for efficient on-farm water management**. Oakland: University of California, 1989. p. 32-33.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 652 p.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. P. R.; SILVA, W. L. C. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa-CNPB, 1986. 12 p. (Embrapa-CNPB. Circular técnica, 2).

MOREIRA, H. J. da C. **S.A.A.C.I. - Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas**: manual prático para o manejo da irrigação. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Irrigação, 1992. 86 p.

MOREIRA, H. J. da C.; TORRES FILHO, D. R. **S.A.A.C.I. - Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas**: manual do usuário. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993. 75 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

RESENDE, M.; ALVES, V. M. C.; FRANÇA, G. E.; MONTEIRO, J. A. Manejo de irrigação e fertilizantes na cultura do milho. **Informe Agropecuário**, v. 14, n. 164, p. 26-34, 1990.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 1995. 304 p.

RICHETTI, A.; FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. S. **Viabilidade econômica da soja irrigada na safra 2015/2016, na região Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 7 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 203). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1025764/1/COT2015203.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2017.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. **Manejo da irrigação do feijoeiro**: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. 46 p. (Embrapa-CNPB. Circular técnica, 27).

SMITH, M. **CROPWAT - Programa de computador para planificar y manejar el riego**. Roma: FAO, 1993. 133 p. (Estudio FAO riego y drenaje, 46).

SOARES, J. M.; COSTA, F. F. Irrigação na cultura da videira. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 194, p. 58-59, 1998.

SOLOMON, K. H. Irrigation systems and their water application efficiencies. **Agribusiness worldwide**, v. 12, n. 5, p. 16-24, 1990.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. Campina Grande: Ed. da UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).

