

136

Circular
TécnicaSete Lagoas, MG
Setembro, 2010**Autor**

Paulo Emílio Pereira de
Albuquerque
Engenheiro Agrícola, D.Sc.,
Pesquisador, Embrapa Milho
e Sorgo, Caixa Postal 151,
35701-970 Sete Lagoas,
MG, E-mail: emilio@cnpm.
embrapa.br

Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo

1. Introdução

A água como insumo da agricultura irrigada contribui com um elevado custo de produção, principalmente devido ao dispêndio com bombeamento, podendo esse valor atingir mais de 30% do custo total (RESENDE et al., 1990).

A agricultura irrigada não pode permitir reduções na produtividade da cultura 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. Por outro lado, a aplicação excessiva é muito mais destrutiva, pois ocorre saturação do solo, o que impede a sua aeração, lixivia nutrientes, induz maior evaporação e salinização e, posteriormente, eleva o lençol freático para um nível que somente pode ser drenado a um alto custo. Mesmo em regiões irrigadas onde o lençol freático é facilmente drenado, permanece o problema da deposição de sais. A salinização da fonte de água poderá afetar os outros irrigantes que estão à jusante da área irrigada (HILLEL, 1982). 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:

1. maximizar a produtividade da cultura;
2. melhorar a qualidade do produto;
3. minimizar o custo da água e da energia;
4. aumentar a eficiência de fertilizantes;
5. diminuir a incidência de doenças e pragas;
6. 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:

1. *Custo da água*: na maioria das situações, a água nada custa ao produtor irrigante;
2. *Custo da energia elétrica*: geralmente, o custo da energia elétrica não é tão alto, o que pode girar em torno de 10% do custo total da produção;
3. *Carência de dados edafoclimáticos*: normalmente, o irrigante não dispõe de análises físico-hídricas do solo e de dados climáticos da sua área;

4. *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;

5. *Técnico e/ou consultoria especializada*: a assistência técnica ao produtor não fornece as opções de manejo da irrigação, por desconhecimento ou por falta de interesse ou, ainda, porque não há demanda por parte do irrigante;

6. *Metodologia*: embora disponível, ainda não foi apresentada aos produtores de forma acessível, de modo que facilite a sua adoção.

A proposta aqui apresentada é mostrar alguns métodos simples e, didaticamente, mostrar alguns cálculos para obter respostas às duas perguntas que qualquer irrigante faz: “quando e quanto irrigar?”. Tendo 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 que lhe foi solicitada, diminui a eficiência do manejo.

2. Alguns critérios de manejo de irrigação

2.1. Frequência de irrigação fixa

A frequência de irrigação (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 evapotranspiração da cultura (ETc), que é a utilizada no projeto 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 as fases da cultura, 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:

$$L = CAD \times f \times Z \quad (\text{eq. 1})$$

em que

LL = lâmina líquida de irrigação (mm)

CAD = capacidade de água total disponível do solo (mm de água/cm de solo)

f = coeficiente de disponibilidade ($0 < f < 1$)

Z = profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

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

$$CAD = \frac{(C - PMP) \times d}{10} \quad (\text{eq. 2})$$

em que

CAD = capacidade de água total disponível no solo (mm de água/cm de solo)

CC = conteúdo de água no solo na capacidade de campo (%peso)

PMP = conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente (%peso)

d = densidade do solo (g de solo/cm³ 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 poderão ser vistas em Andrade et al. (2008). 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 a -30 kPa. (-0,01 a -0,03 MPa – veja a tabela de conversão de unidades de pressão no item 8). 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 murçam de forma permanente. O valor normalmente estabelecido para o PMP está sob o potencial matricial de -1500 kPa ($-1,5$ MPa).

A curva de retenção da água no solo (que está 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 1, desde que se tenha idéia da textura do solo.

A utilização da Tabela 1 requer um certo cuidado, principalmente em alguns latossolos de cerrados, pois, apesar de a textura desses se apresentar argilosa, esses se comportam como solos de textura arenosa (CAD entre 70 e 100 mm/m), em função da presença de óxidos de ferro, que favorecem a formação de agregados pequenos, bastante estáveis, de comportamento semelhante à areia (RESENDE et al., 1995).

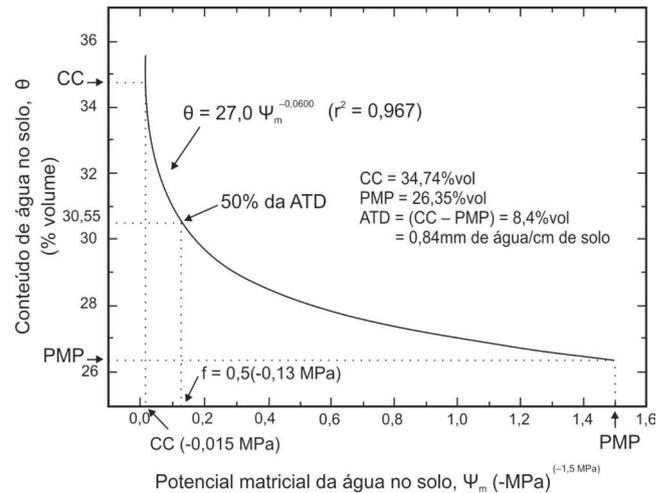


Figura 1. Curva de retenção da água no solo, em que se definem a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP), a capacidade total de água disponível (CAD) e o coeficiente de disponibilidade (f), para o perfil de 0-90cm do Latossolo Vermelho-Escuro da área experimental da Embrapa Milho e Sorgo. Fonte: Albuquerque (1997).

Tabela 1. Valores* aproximados para algumas características físico-hídricas dos solos, segundo a sua classe textural (VERMEIREN; JOBLING, 1997)

Textura do solo	VIB ¹ (cm/h)	Densidade (g/cm ³)	CC ² (%peso)	PMP ³ (%peso)	CAD ⁴ (%peso)	CAD ⁵ (mm/m)
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)

* Primeiro valor representa a média e os valores entre parênteses representam a faixa de variação.

¹VIB = velocidade de infiltração básica

²CC = umidade do solo na capacidade de campo

³PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente

⁴CAD = água total disponível = (CC - PMP)

⁵CAD em lâmina de água por profundidade de solo

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 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 ponto de murcha permanente.

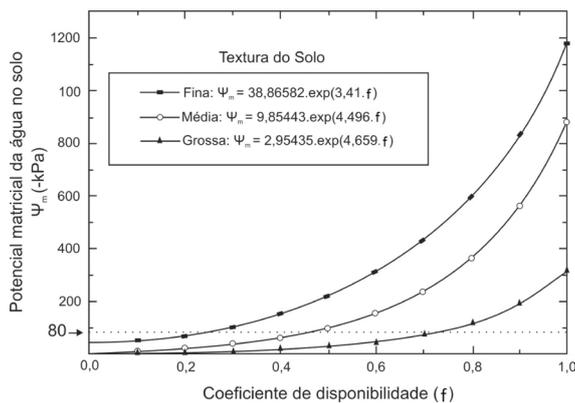


Figura 2. Coeficiente de disponibilidade (f) da água no solo em função do potencial matricial da água no solo (ψ_m), para solos de diferentes texturas (dados adaptados de GRATTAN et al., 1989).

As curvas são diferentes para cada tipo de solo por causa da diferença na distribuição dos tamanhos de poros. Nota-se que a maior parte da CAD em solos de textura grossa (arenosos) está retida no potencial maior que -100 kPa ($-0,1$ MPa), enquanto que em solos de textura fina (argilosos) a maior parte está retida em potenciais bem menores do que -100 kPa.

Devido a esse 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 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 de disponibilidade f representa a fração de esgotamento de água no solo, que pode ser obtido na Tabela 2, em função do grupo de culturas e da evapotranspiração máxima (ETm). 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 0,40 (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Tabela 2. Fator de disponibilidade (f) para grupos de cultura em função da evapotranspiração máxima (ETm)

Grupo de cultura	ETm (mm/dia)								
	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

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979)

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, açafraão, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar e fumo

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z) pode ser estimada para algumas culturas pela Tabela 3. 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 mesmas supostas para a obtenção do coeficiente de cultura (K_c), conforme metodologia descrita no manual 24 da FAO (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

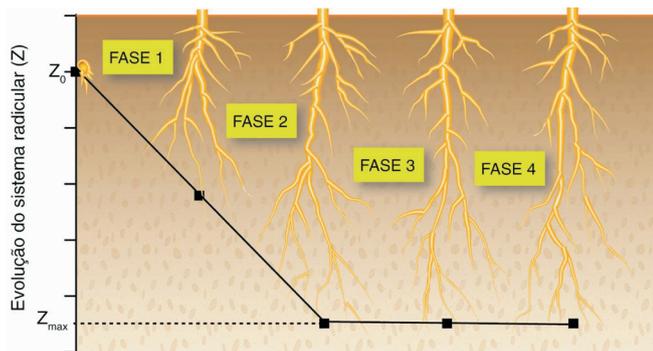


Figura 3. Estimativa do desenvolvimento do sistema radicular de culturas de ciclo curto em função das fases do ciclo da cultura (Z_0 é a profundidade de semeadura e Z_{max} é a profundidade efetiva do sistema em seu desenvolvimento máximo).

Ao se assumir uma profundidade efetiva (Z) para o sistema radicular da cultura, pode ser que na realidade esse esteja mais raso ou mais 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 lâmina líquida de irrigação (LL) pela equação 1, pode-se estimar a lâmina bruta (LB) por:

$$B = \frac{L}{E} \quad (\text{eq. 3})$$

em que

LB = lâmina bruta de irrigação (mm)

LL = lâmina líquida de irrigação (mm)

E_i = eficiência do sistema de irrigação, em decimal (veja Tabela 4).

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

$$F = \frac{L}{ET_c} \quad (\text{eq. 4})$$

Tabela 3 - Profundidade efetiva média (Z) do sistema radicular de algumas culturas

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

Fonte: Arruda et al. (1987) e Brasil (1986), citado por Moreira (1993).

Tabela 4 - 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)

em que

F = frequência de irrigação (dias)

LL = lâmina líquida de irrigação (mm)

ETc = evapotranspiração da cultura obtida do projeto (mm/dia).

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, com 75% de probabilidade de ocorrência, haverá 25% de chance desse valor ser ultrapassado, ou seja, há um risco de 25% de probabilidade da 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 retorno = $1/(1 - \text{probabilidade}) = 1/0,25 = 4$) há risco da cultura sofrer déficit hídrico nessa fase considerada.

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 coeficiente de cultura (K_c) do manual FAO-24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Segundo essa metodologia, o ciclo é geralmente dividido em 4 estádios, de tal modo que se poderia também obter 4 frequências diferentes de irrigação, de acordo com essas fases (veja adiante). Os valores de K_c poderiam servir de referência para reduzir os valores da ETc de projeto.

2.2. Instrumentos de 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 TDR (*Time Domain Reflectometry*), 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 através da 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 (por exemplo, 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 $-0,5$ a $-1,5$ MPa (-500 a -1500 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 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 5 são apresentados alguns desses valores.

Para algumas hortaliças, tem-se os dados de potencial, para início de irrigação, apresentados na Tabela 6.

Tabela 5. Potencial matricial (em kPa) no qual a água deve ser aplicada, para diferentes culturas, para solos fertilizados e manejados para máxima produção

Cultura	Potencial matricial (kPa)	Cultura	Potencial matricial (kPa)
Alfafa	-150	Batata	-30 a -50
Feijão	-75 a -200	Citros	-20 a -100
Alface	-40 a -60	Uva (no início)	-40 a -50
Cana-de-açúcar	-100 a -200	Uva (na maturação)	-100
Cebola (no início)	-45 a -55	Tomate	-80 a -150
Cebola (bulbos)	-55 a -65	Milho (fase vegetativa)	-50
Café	*	Milho (maturação)	-800 a -1200

Fonte: Reichardt (1987)

* requer períodos de potencial baixo, para quebrar dormência, seguidos de período de alto potencial.

Como se pode notar a partir dos dados das Tabelas 5 e 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 3 a 4 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 do estabelecimento do dia da 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 a extração de água pela cultura, e mesmo

durante os processos de irrigação (infiltração) e redistribuição da água no perfil.

Tabela 6. Potencial matricial (em kPa) no qual se deve promover a irrigação para obter produtividade máxima, para algumas hortaliças

Hortaliça	Potencial matricial (kPa)	Hortaliça	Potencial matricial (kPa)
Aipo	-20 a -30	Cenoura (semente)	-400 a -600
Alface	-40 a -60	Ervilha	-30 a -50
Alface (semente)	-80	Melão	-30 a -80
Alho	-40 a -50	Milho-doce	-50 a -100
Batata	-30 a -50	Morango	-20 a -30
Brócolo (crescimento)	-45 a -50	Pepino	-100 a -300
Brócolo	-60 a -70	Repolho	-60 a -70
Cebola	-45 a -65	Tomate	-30 a -200
Cebola (semente)	-150	Vagem	-40 a -80
Cenoura	-30		

Fonte: Marouelli et al. (1986)

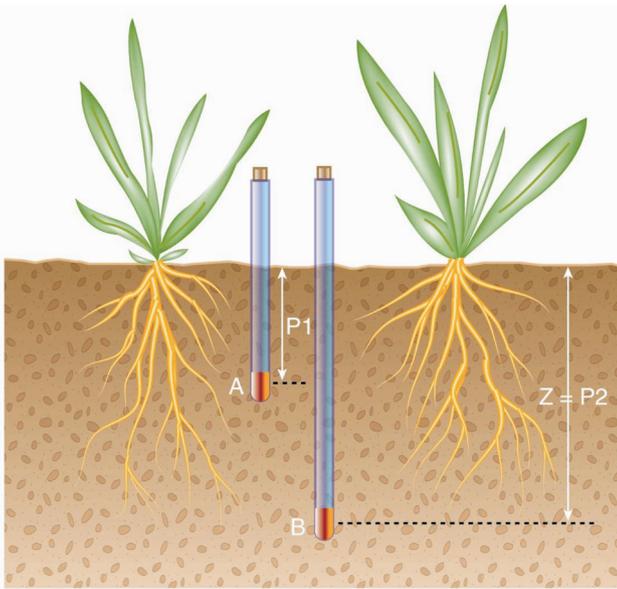


Figura 4. Posição dos instrumentos de medição do potencial ou do conteúdo de água no solo junto às plantas e profundidades de instalação.

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.

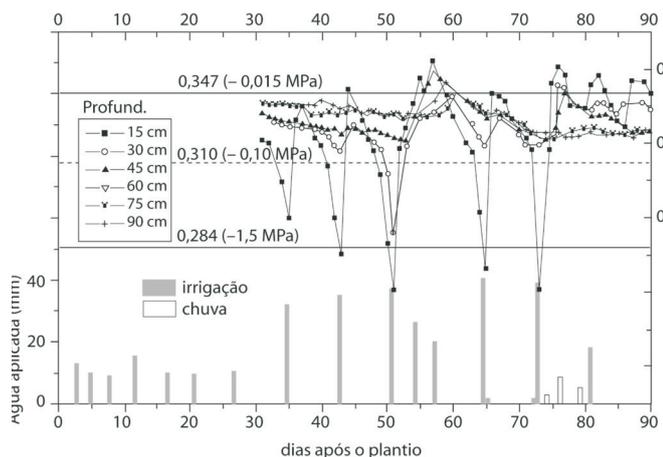


Figura 5. Conteúdo de água no solo, por profundidade de solo, e água aplicada (irrigação e chuva), em relação aos dias após o plantio, em cultura de feijão irrigada com frequência de 8 dias. Fonte: Albuquerque (1997).

Convém salientar que, controlando-se a irrigação através 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 lâmina líquida de irrigação (LL) é dada por:

$$LL = \frac{(CC - U_i)}{10} \times d \times Z \quad (\text{eq. 5})$$

em que

LL = lâmina líquida de irrigação (mm)

CC = capacidade de campo (%peso)

U_i = conteúdo de água no solo, considerado como o limite para início da irrigação (%peso)

d – densidade do solo (g/cm^3)

Z – 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, através da curva de retenção. Nesse caso, os valores de U_i podem ser obtidos pela conversão dos valores de ψ_m mostrados nas Tabelas 5 e 6, através da curva de retenção do solo específico da localidade.

Da mesma forma como visto no item anterior, a lâmina bruta (LB) pode ser obtida pela equação 3.

Há um outro modo de estimar a LL , quando se utilizam instrumentos com sensores instalados em diversas profundidades do solo. Desse modo, poder-se-á traçar o perfil de extração de água pelo solo, não havendo

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); ela será também apresentada no tópico sobre os exemplos de cálculo.

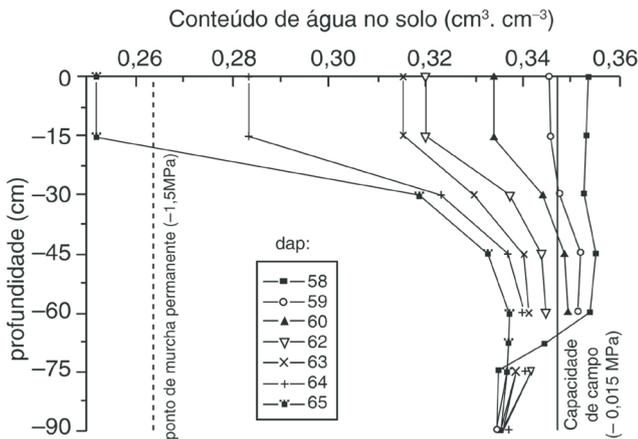


Figura 6. Conteúdo de água no solo, em vários dias após o plantio (dap), em cultura de feijão, submetida à frequência de irrigação de 8 dias. Fonte: Albuquerque (1997).

2.3. Medição ou estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc)

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

Medições diretas da ETc são de uso muito limitado, geralmente se restringindo ao uso em pesquisa. Já as estimativas da ETc, via alguns métodos empíricos ou semi-empíricos (Blaney-Criddle, Hargreaves, Radiação, Penman etc.), são os mais utilizados devido às suas menores necessidades de obtenção de parâmetros meteorológicos.

O tanque *classe A*, como já deve ter sido visto, é muito utilizado para a estimativa da ETc. 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 (ETo) e com o coeficiente de cultura (K_c) estima-se a ETc (veja mais adiante).

Será apresentada aqui a metodologia para se fazer o manejo de irrigação, quando se obtém a ETc medida ou estimada diariamente por um dos métodos citados

anteriormente. Obviamente, a ETc estimada pela evaporação da água do tanque *classe A* instalado próximo à área da cultura torna esta forma de manejo muito mais simples.

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

$$\sum_{i=1}^n (ETc)_i \cong CAD \times f \times Z \quad (\text{eq. 6})$$

em que

$(ETc)_i$ = evapotranspiração da cultura no dia i (mm/dia)

i = dia da obtenção da ETc ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

n = número total de dias necessários para satisfazer a condição da equação, ou seja, é a frequência de irrigação (dias)

CAD = capacidade de água total disponível no solo (mm de água/cm de solo)

f = fator de disponibilidade ($0 < f < 1$)

Z = 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 à irrigação. Assim, a lâmina líquida de irrigação (LL) é obtida do primeiro membro da equação 6, ou seja:

$$L = \sum_{i=1}^n (ETc)_i \quad (\text{eq. 7})$$

em que

LL = 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 no item 1, a lâmina bruta (LB) pode ser obtida pela equação 3.

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

2.4. Uso combinado de variáveis do solo e do clima

Os itens 2.2 e 2.3 apresentaram métodos de estabelecer o manejo da irrigação usando variáveis do solo e do clima, respectivamente. Uma combinação entre ambos pode ser feita visando a programação da irrigação.

A utilização de instrumentos que monitoram o potencial matricial ou o conteúdo de água no solo (tensiômetros, blocos de resistência elétrica, sonda de nêutrons etc.) pode ser útil para verificar o momento de irrigar a cultura, através de um valor preestabelecido do potencial ou do conteúdo de água no solo para efetuar a irrigação. Do mesmo modo como descrito no item 2.2, podem-se usar as Tabelas 5 ou 6 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, neste caso, é a frequência de irrigação (F) encontrada com o instrumento de monitoramento do solo.

Da mesma forma relatada no item 1, a lâmina bruta (LB) pode ser obtida pela equação 3.

3. Balanço diário da água no solo

Tendo-se conhecido alguns dos métodos de estabelecer o manejo de irrigação, pode-se realizar o balanço da água no solo diariamente. Esse balanço é feito à semelhança de uma conta bancária, em que os depósitos são feitos através da irrigação ou chuva e as retiradas, através da evapotranspiração da cultura (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.

Como já descrito, o critério do manejo de irrigação apresentado no item 2.3 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 adicionado ao sistema radicular por ascensão capilar. Quando a irrigação é bem efetuada, na condição ótima, em que não há excesso nem déficit, 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, neste caso, são considerados desprezíveis.

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, 1993; MOREIRA; TORRES FILHO, 1993), Irriger, da UFV/Secretaria de Recursos Hídricos, IrrigaFácil (COELHO et al., 2005), dentre outros.

A título de exemplo de programas disponíveis para fazer o manejo de irrigação, há uma planilha eletrônica que utiliza também o balanço da água no solo, segundo descrevem Albuquerque e Andrade (2001) e Albuquerque (2003, 2007).

4. Uso do tanque de evaporação classe A para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

O tanque de evaporação classe A é circular, com cerca de 120 cm de diâmetro e altura de 25 cm. É construído de chapa galvanizada ou de aço inoxidável. É montado sobre um estrado de madeira com 15 cm de altura. Deve ficar nivelado com a lâmina de água a no máximo 5 cm da borda, não devendo deixar que essa lâmina atinja mais de 7,5 cm da borda,

ocasião em que o tanque deverá ser reabastecido. A água deverá ser regularmente renovada para evitar turbidez. Se for tanque galvanizado, esse deverá ser pintado anualmente com tinta alumínio.

O tanque *classe A* fornece uma medida do efeito integrado da radiação, do vento, da temperatura e da umidade relativa do ar sobre a evaporação de uma superfície livre de água. De um modo similar, as plantas têm a mesma resposta a essas variáveis climáticas, mas muitos fatores podem produzir efeitos diferentes na perda de água pela cultura. A refletividade da radiação solar de uma superfície de água é de apenas 5-8%, enquanto superfícies vegetadas têm esse valor entre 20-25%. O armazenamento de calor no tanque pode ser apreciável e causar evaporação tanto de dia quanto de noite, ao passo que a maioria das culturas só transpira durante o dia. Também a diferença das perdas de água do tanque e das culturas pode ser causada pelas diferenças na turbulência, temperatura e umidade do ar imediatamente acima das superfícies. Além disso, a variação na cor do tanque e o uso de tela podem refletir na perda de água, assim como a sua localização no campo, em função de solo vegetado ou solo nu.

Apesar de todas essas deficiências, o uso racional do tanque para prever requerimento de água das culturas ainda é garantido, principalmente para períodos de 10 dias ou mais.

Para relacionar a evaporação da água do tanque *classe A* com a evapotranspiração de referência, derivou-se um coeficiente empírico, o qual leva em consideração o clima e o ambiente onde se localiza o tanque. Essa relação é a seguinte:

$$ET_o = K_p \times ECA \quad (\text{eq. 8})$$

em que

ET_o = evapotranspiração de referência (mm/dia)

K_p = coeficiente do tanque (adimensional, $0,35 \leq K_p \leq 0,85$)

ECA = evaporação da água do tanque *classe A*, que pode representar o valor médio diário do período considerado (mm/dia).

Snyder (1992) desenvolveu uma equação, que foi adaptada por Albuquerque e Guimarães (2004), para permitir a interpolação dos valores tabelados de K_p (DOORENBOS; PRUITT, 1977), na condição de tanque exposto com bordadura vegetada:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \cdot \ln(R) - 0,02356 \cdot u_{10} + 0,0045 \cdot UR_{\min} \quad (\text{eq. 9})$$

em que

K_p = coeficiente do tanque *classe A*

R = raio de bordadura vegetada ao redor do tanque, no lado dominante do vento (m)

u_{10} = velocidade do vento média diária a 10 m de altura (m/s)

UR_{\min} = umidade relativa mínima diária (%).

Se o tanque estiver circundado por culturas mais altas, como milho com 2,5 m de altura, o K_p deverá ser aumentado em 30%, para condição de clima mais seco e muito vento, enquanto esse acréscimo deverá ser de 5 a 10% se a condição for de vento leve e clima úmido.

Ainda, os valores obtidos da equação 9 se aplicam para tanques galvanizados pintados anualmente de alumínio. Uma pequena diferença nos valores pode ocorrer caso seja pintado externa e internamente de branco e um acréscimo de até 10% pode haver caso seja pintado de preto.

O nível da água mantido no tanque é um aspecto de fundamental importância, podendo ocorrer erros de até 15% quando o nível ultrapassa 10 cm além do padrão de 5 a 7,5 cm abaixo da borda. Há telas montadas sobre o tanque que podem reduzir a evaporação em até 10%. Um modo de evitar que pássaros utilizem a água do tanque para beber é usar um outro tanque próximo com água até a borda, assim, os pássaros deverão preferir o tanque mais cheio. Quando for necessário, esse segundo tanque pode ser usado também para reabastecer o tanque principal, haja vista que a temperatura da água de ambos deve ser a mesma.

A turbidez da água não afeta mais que 5% na evaporação. A variação global da evaporação não é constante ao longo do tempo em decorrência da idade, deterioração e repintura do tanque.

5. Seleção do coeficiente de cultura (Kc)

Neste tópico haverá discussão acerca da metodologia usada para a estimativa do coeficiente de cultura (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, que se desenvolve 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 ou potencial). Portanto, a relação entre ETC e ETO se expressa por:

$$ETc = Kc \times ETo \quad (\text{eq. 10})$$

em que

ETc = evapotranspiração da cultura (mm/dia)

Kc = coeficiente de cultura (adimensional)

ETo = evapotranspiração de referência (mm/dia).

Os procedimentos para selecionar os valores apropriados de Kc 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 ETC e ETO é mostrado na Figura 7. A grande variação entre os grupos de cultura é devido à 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 ETC/ETo.

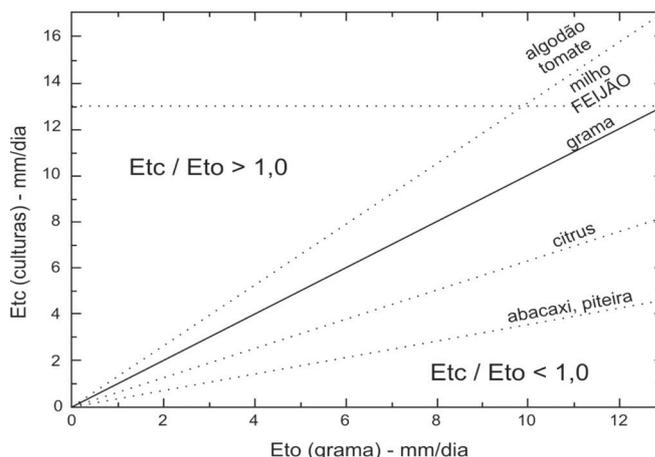


Figura 7. Evapotranspiração da cultura (ETc) comparada com a evapotranspiração de referência (ETo) (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Para condições de evaporação elevada, isto é, clima quente, ventos fortes e baixa umidade do ar, os valores de ETo podem alcançar de 12 a 14 mm/dia e valores de ETC de 15 a 17 mm/dia podem ser reais, particularmente para culturas baixas em regiões áridas que são fortemente afetadas por ventos e ar seco.

5.1. 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, primavera ou 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 2500 m de altitude na África Equatorial; e o ciclo do milho, de 80 a 240 dias, respectivamente.

De acordo com o método da FAO para a estimativa de valores de coeficiente de cultura - Kc (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998), a cultura de ciclo

anual é dividida em quatro fases do ciclo fenológico, conforme a Figura 8. Nessa figura, estão evidenciadas a fase 1, que corresponde ao estágio inicial até o início do desenvolvimento vegetativo pleno (Kc_{ini}), e a fase 3, que corresponde ao estágio de florescimento até o início do enchimento de grãos (Kc_{mid}), cujos valores normalmente são os máximos apresentados para o Kc .

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

1. estágio inicial (fase 1) - que corresponde ao início do crescimento da cultura, quando a superfície do solo não está completamente coberta pela cultura (cobertura do solo < 10%);
2. estágio de desenvolvimento vegetativo (fase 2) - que corresponde de 10% até a 80% de cobertura do solo;
3. estágio de florescimento ou reprodutivo (fase 3) - que 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. estágio de maturação (fase 4) - que corresponde ao início da descoloração (ou queda) das folhas até a plena maturação ou ponto de colheita.

Tabela 7. Faixas de duração total do ciclo (em dias) e duração de cada uma das 4 fases (em percentagem do total) de algumas culturas de ciclo curto, segundo dados obtidos e adaptados de algumas regiões do mundo (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

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

* percentual de duração em relação ao tempo de duração total (Exemplo: uma cultura com duração total de 120 dias que possui 20% de duração para a fase 1; 35% para a fase 2; 25% para a fase 3 e 20% para a fase 4, 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).

** repolho, couve-flor, brócolo etc.

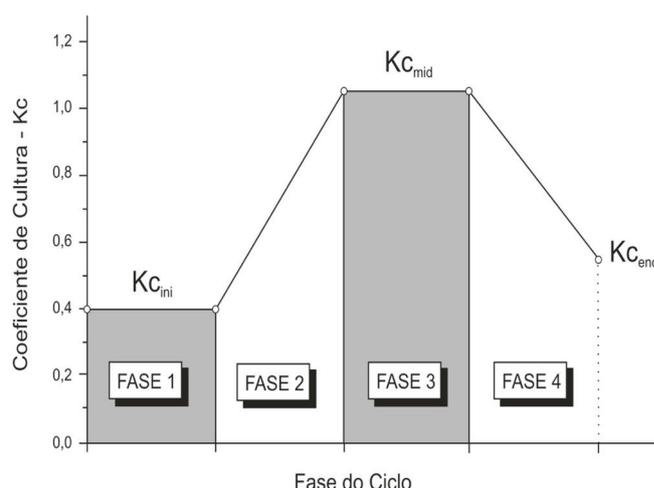


Figura 8. Evolução do coeficiente de cultura (Kc) ao longo do ciclo fenológico de culturas de ciclo anual, evidenciando-se as fases 1 ou inicial (Kc_{ini}) e a 3 ou de florescimento (Kc_{mid}) (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998).

Como referência, a faixa de duração total do ciclo de algumas culturas anuais e o percentual de duração para cada uma das 4 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).

5.2. Coeficiente de cultura (Kc) para culturas de ciclo anual em condição padrão

Na Tabela 8 estão listados valores típicos de Kc em três fases do ciclo de desenvolvimento das culturas, de acordo com o esquema apresentado na Figura 8 (Kc-ini, Kc-mid e Kc-end). 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 umedecimento para cultura padrão, sob condições típicas de desenvolvimento numa área irrigada.

Os valores para o Kc-mid e Kc-end da Tabela 8 representam, para a condição de clima sub-úmido, com umidade relativa mínima (URmin) 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.

Tabela 8. Coeficientes de cultivo único, Kc, e alturas máximas médias de plantas, para cultivos sob condição padrão (culturas bem manejadas, não estressadas, em clima subúmido (URmin* = 45% e u_2^* = 2 m/s) (ALLEN et al. , 1998)

Cultura	Kc-ini	Kc-mid	Kc-end	Altura máxima da cultura – h (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

* URmin = umidade relativa mínima diária; u_2 = velocidade do vento a 2 m da superfície.

¹O primeiro valor é para colheita fresca e o segundo, para colheita de grãos secos.

²Algumas vezes são utilizadas estacas com 1,5 a 2,0 m de altura, assim o valor de Kc-mid pode atingir 1,20.

³Os valores mais baixos referem-se a condições chuvosas com menor densidade populacional.

⁴O primeiro valor para Kc-end é para colheita com alta umidade nos grãos. O segundo valor para Kc-end é para cultura colhida após o grão estar seco (cerca de 18% de umidade à base de peso úmido).

⁵O valor mais alto é para colheita manual.

5.3. Coeficiente de cultura da fase inicial (Kc-ini)

No período específico da sementeira ou do plantio e durante o estágio seguinte de crescimento vegetativo, a frequência de chuva ou irrigação (F) é um parâmetro que influencia muito o Kc nessa fase (Kc-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 Kc-ini para um patamar de até 50%. Portanto, refinamentos dos valores usados para o Kc-ini deveriam ser sempre utilizados. Para umedecimentos frequentes, tais como irrigação por aspersão ou chuva de alta frequência, os valores do Kc-ini podem aumentar significativamente.

Também a demanda evaporativa da atmosfera, ou seja, a intensidade da ET_o , pode afetar significativamente 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 evapotranspiração de referência (ET_o) e com a frequência de irrigação (F) escolhida para essa fase:

$$Kc_{ini} = 1,41704 - 0,092412 \cdot ET_o - 0,11001 \cdot F + 0,0042672 \cdot ET_o^2 + 0,0033743 \cdot F^2 + 0,00028724 \cdot ET_o \cdot F \quad (\text{eq.11})$$

em que

Kc_{ini} = coeficiente de cultura para a fase 1 do ciclo vegetativo de qualquer cultura de ciclo curto

ET_o = evapotranspiração de referência reinante na época da fase 1 (mm/dia, $1 \leq ET_o \leq 10$ mm/dia)

F = frequência de irrigação na fase 1 (dias, $1 \leq TI \leq 20$ dias).

A equação 11 foi gerada através de ajuste realizado por Albuquerque e Andrade (2001) nas curvas apresentadas de $Kc \times ET_o \times F$ 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.

5.4. Coeficientes de cultura da fase reprodutiva (Kc_{mid}) e de maturação (Kc_{end})

O valor do coeficiente de cultura relativo à fase de florescimento ou reprodutiva (Kc_{mid}) se refere à fase

3 e na data de maturação se refere a um valor pontual no fim da fase 4 (Kc_{end}), conforme esquema da Figura 8.

Os efeitos da diferença das propriedades aerodinâmicas entre a grama como cultura de referência e as culturas agrícolas não são apenas intrínsecas 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 valores maiores para o Kc_{mid}

ou Kc_{end} , 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_{mid} e ao Kc_{end} apresentados na Tabela 8, quando a umidade relativa mínima (UR_{min}) for diferente de 45% ou a velocidade do vento (u_2) for maior ou menor do que 2 m/s, é necessária a seguinte equação:

$$Kc = Kc(tab) + [0,04 \cdot (u_2 - 2) - 0,004 \cdot (UR_{min} - 45)](h/3)^{0,3} \quad (\text{eq. 12})$$

em que

Kc = Kc_{mid} ou Kc_{end}

$Kc(tab)$ = valor do Kc_{mid} ou Kc_{end} apresentados na Tabela 8

u_2 = valor médio da velocidade do vento diário a 2 m da superfície, durante a fase 3 (para Kc_{mid}) ou a 4 (para Kc_{end})

UR_{min} = valor médio da umidade relativa mínima diária durante a fase 3 (para Kc_{mid}) ou a 4 (para Kc_{end})

h = altura média da planta durante a fase 3 (para Kc_{mid}) ou a 4 (para Kc_{end}).

Os valores de K_c determinados com a equação 12 são ajustes médios para a fase reprodutiva (K_c -mid) e de maturação (K_c -end). Os valores para as variáveis u_2 e UR_{min} devem ser tomados como os médios para aqueles períodos. Também os limites impostos para ambas variáveis e h devem ser observados.

No caso de K_c -end, a equação 12 deve ser aplicada somente quando os valores tabulados do K_c excederem 0,45. A equação reduz o valor do K_c -end 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, K_c -end > 0,45). Nenhum ajuste é necessário quando K_c -end(tab) < 0,45 (isto é, K_c -end = K_c -end(tab)). Quando as culturas são deixadas senescendo e secando no campo (como evidenciado por K_c -end < 0,45), u_2 e UR_{min} têm menos efeito sobre o K_c -end e o ajuste é desnecessário.

5.5. Passos para obtenção da curva do K_c

Somente três valores do coeficiente de cultivo são necessários para descrever e construir a curva do K_c , segundo esquema mostrado na Figura 8. Esses valores correspondem ao K_c -ini, K_c -mid e K_c -end.

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

- estabelecer a data de plantio (ou semeadura) e informações locais do clima ou de regiões próximas de condições similares;
- 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);
- estádio inicial (fase 1): prever a frequência de irrigação ou de chuva; para um valor predeterminado de ET_o , obter o K_c -ini oriundo da equação 11 e plotar o seu valor como está representado na Figura 8;
- estádio de desenvolvimento vegetativo (fase 2): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de K_c -mid pela equação 12 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 -mid);

- estádio reprodutivo (fase 3): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de K_c -mid conforme o item anterior e assumi-lo como uma linha reta (valor constante) até o início da fase 4;
- estádio de maturação (fase 4): também obter o K_c -end (valor pontual) pela equação 12 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 (ver Figura 8).

6. 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 anteriormente discutida.

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:

$$LL(\text{plantio}) = \frac{(CC - U_o)}{10} \times d \times \text{Prof} \quad (\text{eq. 13})$$

em que

LL = lâmina líquida de irrigação a ser aplicada no dia do plantio (mm)

CC = umidade do solo na capacidade de campo (% peso)

U_o = umidade inicial do solo, ou seja, no dia do plantio (% peso)

d = densidade do solo (g/cm^3)

10 = constante necessária para conversão de unidades

Prof = profundidade do solo 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_0) pode ser determinada pelo método gravimétrico através de amostra retirada do local até a profundidade $Prof.$ Dependendo da condição climática, por exemplo, após um período de seca prolongado, o seu valor poderá até ser menor do que o ponto de murcha permanente (PMP).

7. 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_0) 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 devido à evaporação pela sua superfície. A prática do plantio direto sobre a palhada da cultura antecessora pode contribuir para manter a superfície mais úmida, devido a menores perdas por evaporação.

Nos cálculos da lâmina líquida (LL) para a fase 1 do ciclo da cultura, normalmente fixa-se a frequência 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, através de um exemplo hipotético, analisar essa questão:

Consideremos um solo com Capacidade de Água Total Disponível (CAD) de 1,0 mm/cm de solo, coeficiente de disponibilidade (f) de 0,50 e profundidade de semeadura (Z_0) de 5 cm. Se a evapotranspiração da cultura (ET_c) nessa fase for de 4 mm/dia e se fixarmos a frequência de irrigação (F) em 2 dias, pode-se

calcular a LL através da equação 4 de modo inverso, ou seja:

$$L = ET_c \times F$$

$$L = 4 \times 2 = 8 \cdot m$$

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:

$$f = \frac{LL}{CAD \times Z_0}$$

$$f = \frac{8}{(1 \times 5)} = 1,6$$

Com efeito, o coeficiente f não pode ser maior do que 1, o que pressupõe que haverá retirada de água do solo abaixo do ponto de murcha permanente (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 (mm/cm) x 5 cm = 5 mm. Não há como haver retirada de 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 $LL = ET_c = 4$ 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. Neste presente caso, para manter o f igual a 0,5 haveria necessidade de $F < 1$ dia (em horas) o que, às vezes, é inviável para um manejo prático em condição de campo.

8. Relações entre as unidades de pressão

1 bar = 100 cbar	
1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa	1 atm = 0,1013 MPa = 101,3 kPa
1 bar = 1020 cm.H ₂ O	1 atm = 1033,3 cm.H ₂ O
1 bar = 0,9869 atm	1 atm = 1,0133 bar
1 cm.Hg = 13,6 cm.H ₂ O	1 cm.H ₂ O = 0,0736 cm.Hg

9. Exemplos de cálculos para o manejo de irrigação

9.1. Frequência de irrigação fixa

Deseja-se plantar milho irrigado, cujos dados referentes ao projeto do sistema de irrigação são os seguintes:

- Evapotranspiração máxima da cultura (ET_c) = 6,0 mm/dia
- Capacidade de campo (CC) = 38,2% peso
- Ponto de murcha permanente (PMP) = 25,7% peso
- Densidade do solo (d) = 1,2 g/cm³
- Sistema de irrigação por aspersão convencional.

Determinar a frequência e a lâmina de irrigação.

Resposta:

Pela equação 2, determina-se a capacidade total de água disponível do solo (CAD):

$$CAD = \frac{(CC - PMP) \times d}{10} = \frac{(38,2 - 25,7) \times 1,2}{10}$$

$$CAD = \frac{(12,5) \times 1,2}{10} = 1,5 \text{ mm / cm}$$

Pela Tabela 2, obtém-se o valor do coeficiente de disponibilidade $f = 0,55$ para o milho (grupo de cultura 4 e $ET_c = 6,0$ mm/dia).

Pela Tabela 3, obtém-se o valor da profundidade efetiva do sistema radicular Z . Adotou-se o valor de $Z = 40$ cm.

A lâmina líquida (LL) de irrigação é obtida pela equação 1:

$$LL = CAD \times f \times Z = 1,5 \times 0,55 \times 40$$

$$LL = 33,0 \text{ mm}$$

Na Tabela 4 estão as faixas de valores da eficiência de irrigação (E_i) considerados para o sistema por aspersão convencional móvel. Adotando-se o valor de 75% na equação 3, para o cálculo da lâmina bruta (LB), então:

$$LB = \frac{LL}{E_i} = \frac{33,0}{0,75}$$

$$LB = 44,0 \text{ mm}$$

A frequência de irrigação F é obtida pela equação 4:

$$F = \frac{LL}{ET_c} = \frac{33,0}{6,0}$$

$$F = 5,5 \text{ dias}$$

Como normalmente adota-se F como um número inteiro, então a regra é fazer o arredondamento para baixo, ou seja, $F = 5$ dias, tendo, como consequência, um ajuste no valor da lâmina líquida LL e, por sua vez, do coeficiente f , da seguinte forma:

- Inversão da equação 4:

$$LL = F \times ET_c = 5 \times 6,0$$

$$LL = 30,0 \text{ mm}$$

- Inversão da equação 1:

$$f = \frac{LL}{CAD \times Z} = \frac{30,0}{1,5 \times 40}$$

$$f = 0,50$$

Portanto, o novo valor da lâmina bruta LB ficará:

$$LB = \frac{30,0}{0,75}$$

$$LB = 40,0 \text{ mm}$$

9.2. Frequência de irrigação variável por fase da cultura

Como já comentado, a frequência de irrigação variável é desejável em relação a uma frequência fixa, embora não seja de caráter tão prático quanto esse. Porém, a divisão por fase do ciclo fenológico da cultura atenua o erro ao adotar um sistema que funcione apenas com um único turno de irrigação.

A fase do ciclo fenológico pode ser dividida em quatro para a obtenção de valores dos coeficientes de cultura (K_c). A seleção do K_c pode ser feita seguindo os passos do item 5. Entretanto, haverá necessidade de se conhecer pelo menos as médias dos valores da evapotranspiração de referência (ET_o) em cada uma dessas 4 fases.

Considerando a cultura do milho do mesmo exemplo do item 9.1, com a variação da ET_o ao longo das 4 fases, do seguinte modo:

Fase 1: ET_o médio = 2,5 mm/dia

Fase 2: ET_o médio = 3,2 mm/dia

$$K_{c_{ini}} = 1,41704 - 0,092412 \cdot ET_o - 0,11001 \cdot F + 0,0042672 \cdot ET_o^2 + 0,0033743 \cdot F^2 + 0,00028724 \cdot ET_o \cdot F$$

$$K_{c_{ini}} = 1,41704 - 0,092412 \times 2,5 - 0,11001 \times 3 + 0,0042672 \times (2,5)^2 + 0,0033743 \times (3)^2 + 0,00028724 \times 2,5 \times 3$$

$$K_{c_{ini}} = 1,41704 - 0,23103 - 0,33003 + 0,02667 + 0,0303687 + 0,0021543$$

$$K_{c_{ini}} = 0,915 \cong 0,92$$

O K_c da fase 3 é o $K_{c_{mid}}$ apresentado na equação 12, porém, necessita-se corrigir o valor tabelado (Tabela 8), em função da velocidade do vento e umidade relativa mínima. Na Tabela 8, o $K_{c_{mid}}$ para o milho é 1,20, mas corrigindo-se para uma velocidade média do vento de 1,5 m/s, umidade relativa mínima média no período de 50% e altura h da cultura de 2,0 m, obtém-se pela equação 12:

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

$$K_{c_{mid}} = 1,20 + [0,04 \cdot (1,5 - 2) - 0,004 \cdot (50 - 45)] \cdot (2/3)^{0,3}$$

$$K_{c_{mid}} = 1,20 + [-0,02 - 0,02] \times 0,88547$$

$$K_{c_{mid}} \cong 1,16$$

O K_c da fase 5, que é o $K_{c_{end}}$, corresponde a um valor pontual correspondente à maturação fisiológica. Caso o milho tenha como propósito ser colhido como grãos secos, com baixa umidade, então o $K_{c_{end}}$ pode ser considerado igual a 0,35 (Tabela 8). Portanto, os

Fase 3: ET_o médio = 4,0 mm/dia

Fase 4: ET_o médio = 4,2 mm/dia

Para uma cultura com o ciclo total de 130 dias (do plantio à maturação fisiológica), então, com o auxílio da Tabela 7, obtém-se a seguinte divisão, em número de dias, para cada uma das 4 fases:

Fase 1: 17% de 130 dias = 0,17 x 130 = 22 dias

Fase 2: 28% de 130 dias = 0,28 x 130 = 36 dias

Fase 3: 33% de 130 dias = 0,33 x 130 = 43 dias

Fase 4: 22% de 130 dias = 0,22 x 130 = 29 dias

Determinação do K_c para as 4 fases:

A equação 11 pode fornecer o $K_{c_{ini}}$, que é o K_c da fase 1, para uma condição de cultivo convencional, em solo nu. Considerando que a frequência (F) inicial seja de 3 dias e a ET_o média nessa fase seja 2,5 mm/dia, então:

valores de K_c para as 4 fases do ciclo podem ser:

$K_c(1) = 0,92$ (valor constante)

$K_c(2) = 1,04$ (valor médio entre as fases 1 e 3)

$K_c(3) = 1,16$ (valor constante)

$K_c(4) = 0,76$ (valor médio entre as fases 3 e 5)

Assim, pode-se obter a evapotranspiração da cultura (ET_c) média para cada uma das 4 fases a partir da equação 10:

Fase 1: ET_c (1) = $K_c(1) \times ET_o(1) = 0,92 \times 2,5 = 2,30$ mm/dia

Fase 2: ET_c (2) = $K_c(2) \times ET_o(2) = 1,04 \times 3,2 = 3,33$ mm/dia

Fase 3: ET_c (3) = $K_c(3) \times ET_o(3) = 1,16 \times 4,0 = 4,64$ mm/dia

Fase 4: ET_c (4) = $K_c(4) \times ET_o(4) = 0,76 \times 4,2 = 3,19$ mm/dia

Os coeficientes de disponibilidade f podem ser também obtidos com valores diferentes para cada fase (Tabela 2), ou seja:

$$f(1) = 0,85$$

$$f(2) = 0,77$$

$$f(3) = 0,65$$

$$f(4) = 0,78$$

Pela Figura 3, observa-se que o sistema radicular Z cresce do dia do plantio até o final da fase 2, quando a partir da fase 3 torna-se constante. No exemplo para uma profundidade de semeadura de 5 cm (Z_0), obtém-se aproximadamente valor médio de Z , para as fases 1 e 2, de 15 e 30 cm, respectivamente. Nas fases 3 e 4, o valor é de 40 cm constante, conforme o exemplo do item 9.1.

Portanto, o cálculo da lâmina líquida de irrigação (equação 1), para cada fase, ficará como:

$$LL(1) = CAD \times f(1) \times Z(1) = 1,5 \times 0,85 \times 15 = 19,1 \text{ mm}$$

$$LL(2) = CAD \times f(2) \times Z(2) = 1,5 \times 0,77 \times 30 = 34,7 \text{ mm}$$

$$LL(3) = CAD \times f(3) \times Z(3) = 1,5 \times 0,65 \times 40 = 39,0 \text{ mm}$$

$$LL(4) = CAD \times f(4) \times Z(4) = 1,5 \times 0,78 \times 40 = 46,8 \text{ mm}$$

A lâmina bruta (LB – equação 3) com a eficiência de irrigação de 75% conduzirá a:

$$LB(1) = LL(1) / E_i = 19,1 / 0,75 = 25,5 \text{ mm}$$

$$LB(2) = LL(2) / E_i = 34,7 / 0,75 = 46,3 \text{ mm}$$

$$LB(3) = LL(3) / E_i = 39,0 / 0,75 = 52,0 \text{ mm}$$

$$LB(4) = LL(4) / E_i = 46,8 / 0,75 = 62,4 \text{ mm}$$

Finalmente, as frequências de irrigação (equação 4) para as 4 fases ficarão:

$$F(1) = LL(1) / ETc(1) = 19,1 / 2,30 = 8,3 \text{ dias}$$

$$F(2) = LL(2) / ETc(2) = 34,7 / 3,33 = 10,4 \text{ dias}$$

$$F(3) = LL(3) / ETc(3) = 39,0 / 4,64 = 8,4 \text{ dias}$$

$$F(4) = LL(4) / ETc(4) = 46,8 / 3,19 = 14,7 \text{ dias}$$

Arredondando-se os valores de F para os próximos números inteiros inferiores, então:

$$F(1) = 8 \text{ dias}$$

$$F(2) = 10 \text{ dias}$$

$$F(3) = 8 \text{ dias}$$

$$F(4) = 14 \text{ dias}$$

Portanto, os valores da lâmina líquida (LL) ficarão ajustados em função dos novos valores de F :

$$LL(1) = F(1) \times ETc(1) = 8 \times 2,30 = 18,4 \text{ mm}$$

$$LL(2) = F(2) \times ETc(2) = 10 \times 3,33 = 33,3 \text{ mm}$$

$$LL(3) = F(3) \times ETc(3) = 8 \times 4,64 = 37,1 \text{ mm}$$

$$LL(4) = F(4) \times ETc(4) = 14 \times 3,19 = 44,7 \text{ mm}$$

E as respectivas lâminas brutas (LB) ficarão:

$$LB(1) = LL(1) / E_i = 18,4 / 0,75 = 24,5 \text{ mm}$$

$$LB(2) = LL(2) / E_i = 33,3 / 0,75 = 44,4 \text{ mm}$$

$$LB(3) = LL(3) / E_i = 37,1 / 0,75 = 49,5 \text{ mm}$$

$$LB(4) = LL(4) / E_i = 44,7 / 0,75 = 59,6 \text{ mm}$$

Por sua vez, os valores do coeficiente de disponibilidade f mudarão para:

$$f(1) = \frac{LL(1)}{CAD \times Z(1)} = \frac{18,4}{1,5 \times 15} = \frac{18,4}{22,5} = 0,82$$

$$f(2) = \frac{LL(2)}{CAD \times Z(2)} = \frac{33,3}{1,5 \times 30} = \frac{33,3}{45,0} = 0,74$$

$$f(3) = \frac{LL(3)}{CAD \times Z(3)} = \frac{37,1}{1,5 \times 40} = \frac{37,1}{60,0} = 0,62$$

$$f(4) = \frac{LL(4)}{CAD \times Z(4)} = \frac{44,7}{1,5 \times 40} = \frac{44,7}{60,0} = 0,75$$

9.3. Uso de instrumentos de medir o potencial ou o conteúdo de água no solo

a) Cálculo da lâmina líquida (LL) de irrigação com sensores de solo em duas profundidades:

O ideal neste caso é possuir a curva de retenção ou característica do solo (Figura 1), em que sejam verificados os pontos referentes às umidades ou potenciais da capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP), além da umidade (ou potencial) no qual seja o ponto de referência para controle da irrigação (U_i). Esse ponto U_i possui também um valor correspondente ao coeficiente de disponibilidade f na curva de retenção. O valor de f que corresponde à CC na curva é 1,0 e ao PMP é 0 (ver Figura 1).

O exemplo a seguir pode ser observado na Figura 9, em que a $CC = 0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e o $PMP = 0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$. A umidade em que se estabelece a irrigação (U_i), que corresponde a $f = 0,60$, é igual a $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Essas unidades utilizadas (m^3/m^3) para CC, PMP e U_i são o mesmo que (%peso/100), caso a densidade do solo (d) seja $1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Na Figura 9, supõe-se que há dois sensores em duas profundidades: um no ponto X, a 25 cm de profundidade e o outro no ponto E, a 50 cm de profundidade. O sensor no ponto X, que representa o ponto médio da profundidade efetiva do sistema radicular (Z), indica também o momento de efetuar a irrigação, quando a sua umidade atingir a umidade U_i preestabelecida. O sensor no ponto E, que está na base do Z , serve para observar a variação da umidade nesse ponto, de tal forma que se controle algum excesso ou déficit de umidade abaixo da zona radicular.

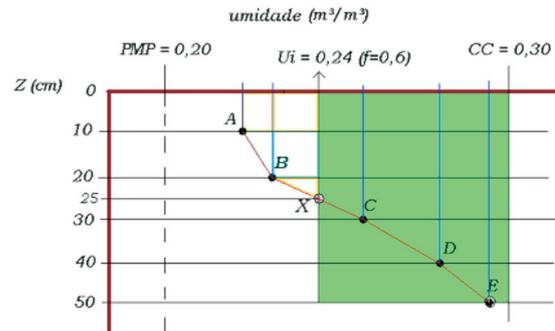


Figura 9. Sensores de solo posicionados em dois pontos abaixo da superfície do solo: no ponto médio da profundidade efetiva das raízes (ponto X – a 25 cm de profundidade) e no ponto inferior (ponto E – a 50 cm de profundidade). Observam-se também as umidades do solo referentes à capacidade de campo (CC); à umidade de referência para irrigação (U_i), que coincide com o coeficiente de disponibilidade f igual a 0,6; e ao ponto de murcha permanente (PMP).

Neste caso, o cálculo da lâmina líquida de irrigação (LL) é proveniente da equação 5. No entanto, com as unidades de LL, em mm, da CC e do PMP, em m^3/m^3 , e do Z , em cm, a equação 5 ficará:

$$LL = (CC - U_i) \times Z \times 10$$

Para o exemplo apresentado na Figura 9:

$$LL = (0,30 - 0,24) \times 50 \times 10 = 0,06 \times 500$$

$$LL = 30,0 \text{ mm}$$

O momento de irrigar a cultura tem como referência o sensor instalado no ponto médio da profundidade efetiva do sistema radicular. Pelo exemplo mostrado na Figura 9, esse sensor está instalado a 25 cm de profundidade (ponto X), cuja umidade referencial para irrigação é de $0,24 \text{ m}^3/\text{m}^3$, que corresponde a um valor f igual a 0,6, que foi obtido pela curva de retenção do solo desse exemplo. Há um exemplo de outra curva de retenção na Figura 1. Também as Tabelas 5 e 6 fornecem valores de potenciais, para diversas culturas, que servem de referências para se efetuar a irrigação, quando os sensores indicarem esses respectivos valores. A transformação de valores de potenciais em umidade, e vice-versa, é obtida pela curva de retenção.

b) Cálculo da lâmina líquida (LL) de irrigação com sensores de solo em várias profundidades:

Um exemplo com sensores de solo em várias profundidades pode ser visto na Figura 10. Nessa figura há sensores instalados em cinco profundidades (A, B, C, D e E), cujo espaçamento entre eles é de 10 cm ($\Delta Z = 10$ cm), perfazendo a profundidade total de 50 cm ($Z = 50$ cm).

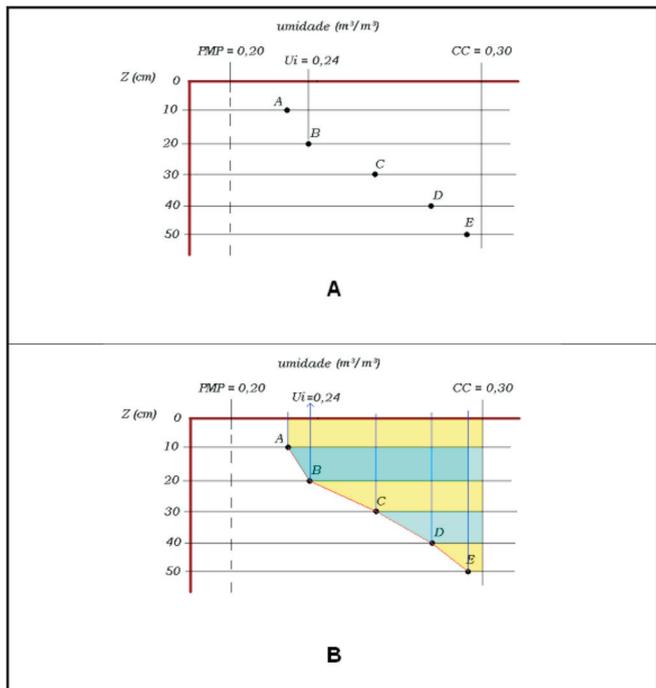


Figura 10. Sensores de solo posicionados em 5 profundidades (A, B, C, D, E) em intervalos de 10 cm ($\Delta Z = 10$ cm), até a profundidade efetiva do sistema radicular ($Z = 50$ cm). Observam-se também as umidades do solo referentes à capacidade de campo (CC); à umidade de referência para irrigação (U_i) e ao ponto de murcha permanente (PMP) (A).

Na junção dos pontos A, B, C, D e E formam-se figuras geométricas que facilitam o cálculo das lâminas líquida (LL) por camada de 10 cm (B).

À semelhança do item a, a equação 5 é a utilizada. Entretanto, o cálculo da lâmina líquida (LL) é feito por camadas de solo de 10 cm de espessura ($\Delta Z = 10$ cm). Cada camada forma uma figura geométrica (trapézio ou retângulo) que facilita o cálculo, pois LL de cada camada será a área de cada uma dessas figuras geométricas. O somatório da LL de cada camada formará a LL total até a profundidade Z (50

cm), da seguinte forma, observando-se a Figura 10-B (as umidades do solo nos pontos A, B, C, D e E, são, respectivamente, U_A , U_B , U_C , U_D e U_E):

Em A:

$$LL_A = (CC - U_A) \times \Delta Z \times 10$$

Sendo LL, em mm; CC e U, em m^3/m^3 , e ΔZ , em cm.

$$LL_A = (0,30 - 0,23) \times 10 \times 10 = 0,07 \times 100$$

$$LL_A = 7,0 \text{ mm}$$

Em B:

$$LL_B = \{[(CC - U_A) + (CC - U_B)] / 2\} \times \Delta Z \times 10$$

$$LL_B = \{[(0,30 - 0,23) + (0,30 - 0,24)] / 2\} \times 10 \times 10$$

$$LL_B = \{[0,07 + 0,06] / 2\} \times 100 = 0,065 \times 100$$

$$LL_B = 6,5 \text{ mm}$$

Em C:

$$LL_C = \{[(CC - U_B) + (CC - U_C)] / 2\} \times \Delta Z \times 10$$

$$LL_C = \{[(0,30 - 0,24) + (0,30 - 0,26)] / 2\} \times 10 \times 10$$

$$LL_C = \{[0,06 + 0,04] / 2\} \times 100 = 0,050 \times 100$$

$$LL_C = 5,0 \text{ mm}$$

Em D:

$$LL_D = \{[(CC - U_C) + (CC - U_D)] / 2\} \times \Delta Z \times 10$$

$$LL_D = \{[(0,30 - 0,26) + (0,30 - 0,28)] / 2\} \times 10 \times 10$$

$$LL_D = \{[0,04 + 0,02] / 2\} \times 100 = 0,030 \times 100$$

$$LL_D = 3,0 \text{ mm}$$

Em E:

$$LL_E = \{[(CC - U_D) + (CC - U_E)] / 2\} \times \Delta Z \times 10$$

$$LL_E = \{[(0,30 - 0,28) + (0,30 - 0,29)] / 2\} \times 10 \times 10$$

$$LL_E = \{[0,02 + 0,01] / 2\} \times 100 = 0,015 \times 100$$

$$LL_E = 1,5 \text{ mm}$$

TOTAL:

$$LL = LL_A + LL_B + LL_C + LL_D + LL_E$$

$$LL = 7,0 + 6,5 + 5,0 + 3,0 + 1,5$$

$$LL = 23,0 \text{ mm}$$

As lâminas brutas (LB), tanto para o item “a” quanto para o “b”, são calculadas pela equação 3, necessitando-se da eficiência de irrigação (Ei).

9.4. Uso da evapotranspiração da cultura (ETc) diária

Considerando a CAD do solo do exemplo do item 9.1 (1,5 mm/cm), a cultura do milho na fase 3 com o mesmo coeficiente de cultura Kc (1,16) do item 9.2, o mesmo coeficiente de disponibilidade f também do item 9.1 (0,55), assim como o mesmo Z (40 cm), tem-se os seguintes valores diários de ETo, determinados ou medidos por qualquer método:

data	ETo (mm)
05/07	2,5
06/07	3,2
07/07	1,5
08/07	2,8
09/07	3,4
10/07	3,0
11/07	2,1
12/07	2,3
13/07	3,8
14/07	4,0
15/07	3,3
16/07	2,7
17/07	2,9

A evapotranspiração da cultura (ETc) diária ficará assim, segundo a equação 10:

data	ETo (mm)	Kc	ETc (mm)
05/07	2,5	1,16	2,90
06/07	3,2	1,16	3,71
07/07	1,5	1,16	1,74
08/07	2,8	1,16	3,25
09/07	3,4	1,16	3,94
10/07	3,0	1,16	3,48
11/07	2,1	1,16	2,44
12/07	2,7	1,16	3,13
13/07	3,8	1,16	4,41
14/07	4,0	1,16	4,64
15/07	3,3	1,16	3,83
16/07	2,7	1,16	3,13
17/07	2,9	1,16	3,36

A lâmina líquida (LL) calculada no item 9.1 gerou o valor de 33,0 mm. Observando-se a equação 6, o somatório dos valores da ETc dos dias que produzirão o valor aproximado de 33,0 mm está entre os dias 05 e 14/07, cujo somatório real gera o valor de 33,6 mm, que é o valor da lâmina líquida, conforme a equação 7, e a frequência de irrigação é de 10 dias.

Da mesma forma que os exemplos anteriores, o valor de f deverá ser ajustado em função do novo valor da LL (33,6 mm), da seguinte forma:

$$f = \frac{LL}{CAD \times Z} = \frac{33,6}{1,5 \times 40} = \frac{33,6}{60} = 0,56$$

9.5. Uso combinado da ETc diária com algum instrumento de medir o potencial ou o conteúdo de água no solo

Como visto no item 2.4, uma forma prática de fazer o manejo de irrigação, sem a necessidade da curva de retenção da água no solo, é através da combinação de sensores de solo com algum método de medir ou estimar a ETc ou ETo \times Kc. A lâmina líquida (LL), neste caso, é dada pelo somatório da ETc (como visto no item 9.4), sendo que o momento de se efetuar a irrigação é o dia em que o sensor do solo atingir o valor da umidade ou do potencial preestabelecido para tal, como se apresentam as Tabelas 5 e 6.

Assim, por exemplo, observando-se os valores diários da ETc na tabela do exemplo no item 9.4, se uma irrigação foi realizada no dia 04/07 e se o sensor no solo indicar um potencial para irrigar o milho com -50 kPa (Tabela 5) no dia 14/07, cuja LL = 33,6 mm, que é o somatório dos valores da ETc entre os dias 05 e 14/07, a frequência de irrigação F é 10 dias.

10. Referências

ALBUQUERQUE, P. E. P. **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 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

ALBUQUERQUE, P. E. P. **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. **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.; 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.; 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**, Brasília, v. 63, p. 12-19, 2004.

ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M.; FRANÇA, G. E.; MAGALHÃES, P. C. Efeito da época de suspensão da irrigação na produtividade do milho. **Relatório Técnico Anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1988-1991**, Sete Lagoas, v. 5, p. 29-30, 1992.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: 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**, Campinas, v. 11, p. 11-15, 1987.

COELHO, E. A.; RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; FARIA, C. M.; VIANELLO, R. L. Irriga fácil: um software para manejo da irrigação utilizando valores de evapotranspiração de referência (ET_o) ajustados e preditos. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA AGRICULTURA IRRIGADA, 2005, Teresina. **Anais...** Teresina: ABID: Governo do Desenvolvimento do Piauí, 2005. 1 CD-ROM.

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**. Rome: 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.

HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982. v. 1.

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

MOREIRA, H. J. C. **S.A.A.C.I. - Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas: manual prático para o manejo da irrigação**. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993. 86 p.

MOREIRA, H. J. C.; TORRES FILHO, D. R. **S.A.A.C.I. - Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas: manual do usuário**. Brasília: Secretaria 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**, Belo Horizonte, v. 14, n. 164, p. 26-34, 1990.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304 p.

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

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

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, p. 977-980, 1992.

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

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

Circular Técnica, 136

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Milho e Sorgo
Endereço: Rod. MG 424 km 45 - Caixa Postal 151
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
E-mail: sac@cnpmembrapa.br

1ª edição
1ª impressão (2010): 200 exemplares

Comitê de publicações

Presidente: Antônio Carlos de Oliveira
Secretário-Executivo: Elena Charlotte Landau
Membros: Flávio Dessaune Tardin, Eliane Aparecida Gomes,
Paulo Afonso Viana, João Herbert Moreira Viana, Guilherme
Ferreira Viana e Rosângela Lacerda de Castro

Expediente

Revisão de texto: Antonio Claudio da Silva Barros
Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro
Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa