



# Requerimento de Água das Culturas para Fins de Manejo e Dimensionamento de Sistemas de Irrigação Localizada



## **REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

Presidente

FERNANDO HENRIQUE CARDOSO

### **Ministério da Agricultura e do Abastecimento**

Ministro

Marcus Vinícius Pratini de Moraes

### **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**

Presidente

ALBERTO DUQUE PORTUGAL

Diretores

ELZA ANGELA BATTAGGIA BRITO DA CUNHA

JOSÉ ROBERTO RODRIGUES PERES

DANTE DANIEL GIACOMELLI SCOLARI

### ***Embrapa Milho e Sorgo***

Chefe Geral

ANTÔNIO FERNANDINO DE CASTRO BAHIA FILHO

Chefe Adjunto de Pesquisa

IVAN CRUZ

Chefe Adjunto de Administração

JOÃO CARLOS GARCIA

Chefe Adjunto de Comunicação e Negócios

JOSÉ HAMILTON RAMALHO

# Requerimento de Água das Culturas para Fins de Manejo e Dimensionamento de Sistemas de Irrigação Localizada

*Paulo Emílio Pereira de Albuquerque*

**Embrapa**

---

*Milho e Sorgo*

Copyright © EMBRAPA - 2000  
Embrapa Milho e Sorgo  
Caixa Postal 151  
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG  
Telefone: (031) 779-1000  
Fax (031) 779-1088  
www.cnpms.embrapa.br  
sac@cnpms.embrapa.br

**Tiragem:** 500 exemplares

**Editor:** Comitê de Publicações da Embrapa Milho e Sorgo

*Ivan Cruz (Presidente), Frederico Ozanan Machado Durães (Secretário), Antônio Carlos de Oliveira, Arnaldo Ferreira da Silva, Edilson Paiva, Paulo César Magalhães, Jamilton Pereira dos Santos*

**Revisão:** *Dilermando Lúcio de Oliveira*

**Diagramação:** *Tânia Mara Assunção Barbosa*

**Normalização bibliográfica:** *Maria Tereza R. Ferreira*

**Coordenação Editorial:** *Área de Comunicação Empresarial da Embrapa Milho e Sorgo*

A345r  
2000

ALBUQUERQUE, P.E.P. de. Requerimento de água das culturas para fins de manejo e dimensionamento de sistemas de irrigação localizada. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2000.

54p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 1).

Irrigação; Manejo; Evapotranspiração; Irrigação localizada.

CDD 631.7

# Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	5
2. NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS .....	6
2.1. Cálculo da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) .....	7
2.1.1. Método do Tanque Classe A .....	8
2.1.2. Outros Métodos .....	12
2.2. Seleção do Coeficiente de Cultura (k <sub>c</sub> ) .....	12
2.3. Cálculo da evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> ) irrigada por sistema localizado.....	22
3. ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO .....	27
3.1. Capacidade de Campo (CC) ou Limite Superior de Água Disponível .....	28
3.2. Ponto de Murcha Permanente (PMP) ou Limite Inferior de Água Disponível .....	29
3.3. Água Total Disponível (ATD) .....	29
3.4. Água Facilmente Disponível (AFD) .....	32
3.5. Profundidade Efetiva do Sistema Radicular (Z) .....	34
4. LÂMINA LÍQUIDA E TURNO DE IRRIGAÇÃO .....	36
4.1. Lâmina Líquida (LL) .....	36
4.2. Medição ou Estimativa da Porcentagem de Solo Molhado (P) .....	37
4.3. Turno de Irrigação (TI).....	43
5. LÂMINA BRUTA DE IRRIGAÇÃO (LB) .....	44
5.1. Eficiência de Irrigação (Ef) .....	45
5.2. Coeficiente de Uniformidade em Irrigação Localizada (CUIL) .....	46
6. VAZÃO POR EMISSOR OU POR GRUPO DE EMISSORES ...	48
6.1. Duração de Irrigação (h) .....	48
6.2. Cálculo da Vazão do Emissor (Q <sub>e</sub> ) .....	49
7. EXEMPLO DE CÁLCULO .....	50
8. AGRADECIMENTOS .....	53
9. LITERATURA CITADA .....	53

# REQUERIMENTO DE ÁGUA DAS CULTURAS PARA FINS DE MANEJO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

*Paulo Emílio Pereira de Albuquerque<sup>1</sup>*

## 1. INTRODUÇÃO

O primeiro passo para a elaboração do projeto e o dimensionamento de qualquer sistema de irrigação é determinar as necessidades hídricas das culturas que serão implantadas.

Geralmente, esses cálculos são realizados para as condições críticas que poderão ocorrer com a cultura em função do solo, do clima, da fase dessa cultura e da época do ano.

Por isso, deve-se definir com clareza a diferença entre as necessidades máximas de irrigações que se utilizam para o cálculo do diâmetro das tubulações, do dimensionamento do conjunto motobomba etc. e as necessidades normais de irrigação que controlam o funcionamento do sistema. Portanto, o que importa para o projetista são as necessidades máximas, que permitem calcular a hidráulica das instalações. As necessidades normais, que são do interesse do irrigante durante a condução do dia-a-dia da sua cultura, são obtidas pelo manejo de irrigação, que é o ajustamento da duração e/ou freqüência de irrigação em função da lâmina de água requerida para determinada fase ou período do ciclo da cultura (Vermeiren e Joblin, 1997).

---

<sup>1</sup> *Engenheiro Agrícola, D.S., Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG. Tel.: (031) 779-1237.*

*Fax: (031) 779-1088. E-mail: emilio@cnpms.embrapa.br*

A irrigação localizada é utilizada em culturas onde somente uma parte da área está totalmente coberta pelas plantas, como ocorre comumente com fruteiras e algumas olerícolas. Na irrigação por superfície ou por aspersão, toda a superfície do solo que a cultura não cobre e que é molhada pela irrigação sofre perda de água, devido à evaporação do solo e à transpiração de plantas daninhas. O cálculo das necessidades hídricas determinado para esses sistemas inclui essas perdas; entretanto, para o cálculo das necessidades hídricas das culturas em irrigação localizada, deve-se aplicar um coeficiente de redução ( $k_r$ ), tendo em vista que, geralmente, apenas uma parte da superfície do solo é molhada (Vermeiren e Joblin, 1997).

## **2. NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS**

De modo geral, a água necessária a uma determinada cultura é equivalente à evapotranspiração (evaporação de água do solo + transpiração das plantas) de uma cultura livre de doenças e se desenvolvendo em um local em condições ótimas de solo e clima. A condição ótima de solo consiste em nível de fertilidade e umidade suficientes para a cultura alcançar a sua produção potencial no meio considerado. Daí, a necessidade hídrica de uma cultura é baseada em sua evapotranspiração ( $ET_c$ ) e é expressa, normalmente, em milímetros por dia (mm/dia).

Podem ser obtidos os dados necessários à demanda hídrica da cultura através de medições realizadas diretamente no campo. Entretanto, os procedimentos de medidas diretas são demorados e trabalhosos, sendo esses mais utilizados em condições de pesquisa. Dessa forma, os métodos estimativos são os mais utilizados.

A precisão na determinação das necessidades hídricas das culturas depende muito da natureza dos dados climáticos disponíveis e da precisão do método selecionado para estimar a evapotranspiração. Muitos detalhes dos procedimentos de cálculo das necessidades hídricas das culturas se encontram em

Doorenbos e Pruitt (1984) e Allen et al (1998). De forma mais simplificada, serão apresentados a seguir alguns pontos básicos para esse cálculo.

## 2.1. Cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

A evapotranspiração de referência ET<sub>o</sub> é definida como “a evapotranspiração de uma superfície considerável de grama verde a uma altura uniforme (entre 8 e 15 cm), sob desenvolvimento ativo, que recobre completamente o solo, sem limitação hídrica”.

Com base nos dados meteorológicos disponíveis, seleciona-se um método para se calcular a ET<sub>o</sub>. É evidente que quanto maior for a disponibilidade de dados, também deverá ser maior a precisão na estimativa de ET<sub>o</sub>.

Na Tabela 1 estão apresentados os quatro métodos recomendados pela FAO (Doorenbos e Pruitt, 1984), com os respectivos dados climáticos necessários a cada método para a estimativa da ET<sub>o</sub>.

Segundo Vermeiren e Joblin (1997), os métodos de Penman e da Radiação Solar são os melhores para estimar as médias de períodos curtos, em torno de dez dias. O método da evaporação em tanque vem em segundo lugar, podendo ser preferível quando a sua posição é adequada e em condição de ventos fracos. Em muitos climas, o método de Blaney-Criddle é o melhor para períodos de um mês ou mais.

Aqui somente será mostrado o método do tanque Classe A para a estimativa de ET<sub>o</sub>. Os outros três métodos são mostrados com bastante detalhe, ainda ilustrados com exemplos, em Doorenbos e Pruitt (1984) e Allen et al (1998).

A ET<sub>o</sub> pode ser estimada com base em séries históricas da região (no mínimo 15 anos), para períodos de 30 dias ou superior a dez dias, utilizando-se os dados médios de cada período. Os valores extremos são analisados em amplitude e freqüência e depois é feita a sua distribuição de freqüência para diversos níveis de probabilidade de ocorrência, que pode ser, para efeito de dimensionamento, de 75%.

**Tabela 1.** Dados climáticos necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), segundo quatro métodos recomendados pela FAO (Doorenbos e Pruitt, 1984)

Método	Temperatura	Umidade Relativa	Vento	Insolação	Radiação	Evaporação	Ambiente
Blaney-Criddle	*	o	o	o	-	-	o
Radiação	*	o	o	*	(*)	-	o
Penman	*	*	*	*	(*)	-	o
Tanque Classe A	-	o	o	-	-	*	*

\*dados medidos; o dados estimados; (\*) se disponível, mas não essencial; - não necessário

### 2.1.1. Método do Tanque Classe A

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 essa lâmina atingir 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 que 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 dez 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:

$$E_{To} = k_t \times E_{CA} \quad (1)$$

em que:

$E_{To}$  = evapotranspiração de referência (mm/dia);

$k_t$  = coeficiente do tanque (adimensional,  $0,35 \leq k_t \leq 0,85$  – Tabela 2);

$E_{CA}$  = evaporação da água do tanque Classe A, que pode representar o valor médio diário do período considerado (mm/dia).

A Tabela 2 apresenta os valores de  $k_t$ , em função das condições de vento, da umidade relativa do ar e do ambiente em que se localiza o tanque.

Os valores de  $k_t$  da Tabela 2 são para tanques colocados em campo aberto, com culturas não mais altas do que 1 m, num raio a 50 m do tanque. O raio de bordadura (R) refere-se ao lado dominante do vento, conforme mostrado na Figura 1.

A faixa de umidade relativa (UR) referida na Tabela 2 é a UR média ou  $(UR_{m\acute{a}x} + UR_{m\acute{i}n})/2$ . O vento corresponde à sua velocidade dentro de 24 h (em km/dia).

Quando o tanque estiver localizado numa estação com cobertura vegetal muito rala ou solo seco nu ou, indesejavelmente, sobre concreto ou asfalto, a temperatura do ar no nível do tanque pode estar 2 a 5°C mais elevada e a UR 20 a 30% mais baixa. Isso é mais pronunciado em climas árido e semi-árido. Esse efeito já está considerado nos valores da Tabela 2. Entretanto, em áreas sem cultivo e extensivas de solo nu, como as encontradas em condições desérticas e semi-desérticas, os valores de  $k_t$  fornecidos

para clima árido com vento muito forte podem ser reduzidos para mais de 20%; para áreas com níveis moderados de temperatura, umidade relativa e vento, a redução deve ser de 5 a 10%. Nenhuma redução se faz necessária se a condição for de clima úmido e frio.

**Tabela 2.** Coeficiente de tanque (kt) para diferentes condições de cobertura de solo, de níveis de umidade relativa média do ar e de vento de 24 h (Doorenbos e Pruitt, 1984)

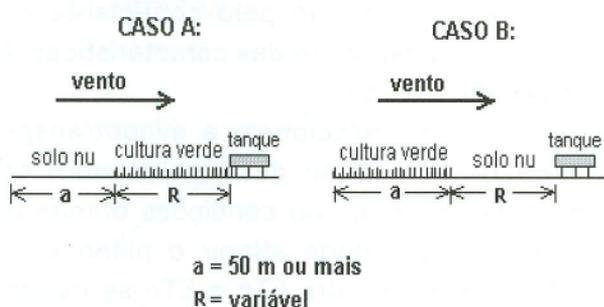
Caso A: tanque exposto em local coberto com vegetação verde					Caso B: tanque exposto em local de solo nu			
UR* média (%)		Baixa < 40	Média 40 - 70	Alta > 70		Baixa < 40	Média 40 - 70	Alta > 70
Vento (km/dia)	Bordadura (R) m				Bordadura (R) m			
Leve	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
< 175	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
(<2 m/s)	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,70
Mode-	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
rado	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
175-425	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
(2-5m/s)	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
Forte	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
425-700	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
(5-8m/s)	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55
Muito	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
Forte	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
> 700	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
(>8 m/s)	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

\* umidade relativa (UR)

Se o tanque estiver circundado por culturas mais altas, como, por exemplo, milho com 2,5 m de altura, o kt 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.

Os valores da Tabela 2 se aplicam ainda a 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 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.



**Figura 1.** Casos **A** (bordadura com vegetação verde) e **B** (bordadura de solo nu), conforme a Tabela 2, para observação do raio de bordadura ( $R$ ) em função da direção do vento dominante.

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.

### 2.1.2. Outros Métodos

Muitos são os métodos para estimar a ETo, além daquele por intermédio do tanque Classe A. Pode-se recorrer à literatura especializada para tal, incluindo aí Doorenbos e Pruitt (1984) e, mais recentemente, Allen et al. (1998).

### 2.2. Seleção do Coeficiente de Cultura (kc)

A ETc é a soma da transpiração da cultura e a evaporação da superfície do solo. A partir da cobertura completa do solo pela cultura, a evaporação torna-se desprezível, 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 freqüentes.

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. Portanto, a relação entre ETc e ETo se expressa por:

$$ETc = kc \times ETo \quad (2)$$

em que:

ETc = evapotranspiração da cultura (mm/dia);

kc = coeficiente de cultura (adimensional, Tabelas 4, 6, 7 e 8);

ETo = evapotranspiração de referência (mm/dia).

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 sementeira, 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 2. 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 (citrus). Também diferenças na altura, rugosidade da cultura, reflexão e cobertura do solo produzem a variação ilustrada na relação  $ET_c/ET_o$ .

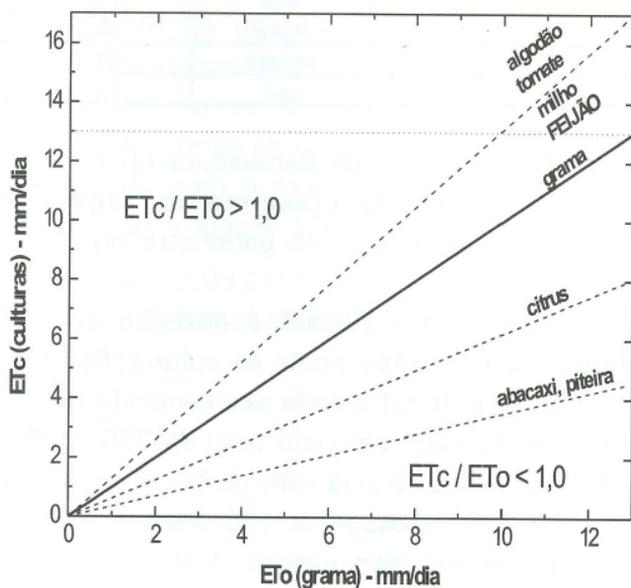


Figura 2. Evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) comparada com a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) (Doorenbos e Pruitt, 1984).

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.

Algumas faixas aproximadas de valores de ETc obtidos por ciclo total da cultura são apresentadas na Tabela 3. As magnitudes mostradas poderão alterar em função daqueles fatores discutidos, principalmente das características da cultura e do clima, da duração do ciclo de desenvolvimento e da época de plantio.

**Tabela 3.** Limites aproximados da evapotranspiração da cultura (ETc) para o ciclo completo de desenvolvimento de algumas culturas (Doorenbos e Pruitt, 1984)

Cultura	ETc total (mm)	Cultura	ETc total (mm)
abacate	650 – 1000	milho	400 – 750
banana	700 – 1700	cebola	350 – 600
feijão	250 – 500	soja	450 – 825
café	800 – 1200	fumo	300 – 500
cana-de-açúcar	1000 – 1500	tomate	300 – 600
algodão	550 – 950	uva	450 – 900

No período específico da semeadura ou do plantio e durante o estágio seguinte de crescimento vegetativo, a frequência de chuva ou irrigação é um parâmetro que influencia muito o kc.

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, a 2.500 m de altitude, na África Equatorial, e o ciclo do milho, de 80 a 240 dias, respectivamente.

As condições gerais de clima, especialmente vento e umidade relativa do ar, também são fatores que influem o kc. Por exemplo, o vento afeta com maior intensidade a taxa de

transpiração de culturas de porte mais alto, quando comparadas com uma cobertura lisa de grama, isso devido à turbulência do ar acima da superfície rugosa da cultura, sendo esse efeito mais pronunciado em climas secos, cujos valores de  $k_c$  também serão maiores.

Aqui será mostrada a metodologia apresentada pela FAO (Doorenbos e Pruitt, 1984) para estimar o  $k_c$  das culturas. As culturas estão divididas por classe: culturas de ciclo curto (grãos e algumas olerícolas) e culturas de ciclo longo ou permanentes (banana, café, citrus, manga, uva e abacaxi).

#### a) **Culturas de Ciclo Curto:**

O ciclo total da cultura é dividido em quatro fases. Alguns valores do coeficiente de cultura ( $k_c$ ) para algumas dessas fases e para algumas culturas de ciclo anual estão apresentados na Tabela 4. Como referência, a faixa de duração total do ciclo de algumas dessas culturas e o percentual de duração para cada uma dessas quatro fases estão mostrados na Tabela 5, a qual foi gerada a partir da adaptação de dados médios obtidos em diferentes localidades, segundo Doorenbos e Pruitt (1984).

Para facilitar a escolha do valor de  $k_c$  na fase 1 do ciclo da cultura, pode-se contar com o auxílio da seguinte equação, de acordo com a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e com o turno de irrigação ( $TI$ ) escolhido para essa fase:

$$k_c = 1,41704 - 0,092412 \times ET_o - 0,11001 \times TI + 0,0042672 \times ET_o^2 + 0,0033743 \times TI^2 + 0,00028724 \times ET_o \times TI \quad (R^2 = 0,981) \quad ( 3 )$$

em que:

$k_c$  = 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);

$TI$  = turno de irrigação na fase 1 (dias,  $1 \leq TI \leq 20$  dias);

$R^2$  = coeficiente de determinação do ajuste.

**Tabela 4.** Coeficientes de cultura (kc) para algumas culturas de ciclo curto, em quatro fases do ciclo de desenvolvimento, em função das condições climáticas predominantes (Doorenbos e Pruitt, 1984).

cultura	Umid. relativa	UR <sub>mí</sub> n	>70% *	UR <sub>mí</sub> n	<20% *	cultura	Umid. relativ a	UR <sub>mí</sub> n	>70% *	UR <sub>mí</sub> n	<20% *
	Vento (m/s)	0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8		Vento (m/s)	0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
	Fase da cultura						Fase da cultura				
Todas	1	Usar a para	eq. 3 estimar	Usar a para	eq. 3 estimar	Feijão vagem	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	2						4	0,85	0,85	0,9	0,9
Alface	3	0,95	0,95	1,0	1,05	Feijão seco	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,9	0,9	0,9	1,0		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Algodão	3	1,05	1,15	1,2	1,25	Girassol	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,65	0,65	0,65	0,7		4	0,4	0,4	0,35	0,35
Amei-doim	3	0,95	1,0	1,05	1,1	Melão**	3***	0,95	0,95	1,0	1,05
	4	0,55	0,55	0,6	0,6		4	0,65	0,65	0,75	0,75
Batata	3	1,05	1,1	1,15	1,2	Milho doce	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,7	0,7	0,75	0,75		4	0,95	1,0	1,05	1,1
Berinjela	3	0,95	1,0	1,05	1,1	Milho grãos	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,8	0,85	0,85	0,9		4	0,55	0,55	0,6	0,6
Beteraba	3	1,0	1,0	1,05	1,1	Pepino	3	0,9	0,9	0,95	1,0
	4	0,9	0,9	0,95	1,0	(cons. fresco)	4	0,7	0,7	0,75	0,8
						(colh. mec.)	4	0,85	0,85	0,95	1,0
Cebola verde	3	0,95	0,95	1,0	1,05	Rabane-te	3	0,8	0,8	0,85	0,9
	4	0,95	0,95	1,0	1,05		4	0,75	0,75	0,8	0,85
Cebola seca	3	0,95	0,95	1,05	1,1	Tomate	3	1,05	1,1	1,2	1,25
	4	0,75	0,75	0,8	0,85		4	0,6	0,6	0,65	0,65
Cenou-ra	3	1,0	1,05	1,1	1,15						
	4	0,7	0,75	0,8	0,85	Trigo	3	1,05	1,1	1,15	1,2
							4	0,25	0,25	0,2	0,2
Crucí-feras*	3	0,95	1,0	1,05	1,1						
	4	0,8	0,85	0,9	0,95						

\* para valores de UR entre 20 e 70% fazer interpolação.

\*\* repolho, couve-flor, brócolis etc.

\*\*\* exemplo adotado para a Figura 3.

**Tabela 5.** 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 (Doorenbos e Pruitt, 1984).

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, brócolis etc.

\*\*\* exemplo adotado para a Figura 3.

A equação 3 foi gerada através de ajuste realizado nas curvas apresentadas de  $kc \times ETo \times TI$  por Doorenbos e Pruitt (1984), para a estimativa dos valores de  $kc$  para qualquer cultura de ciclo curto na fase 1 do seu ciclo de desenvolvimento.

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

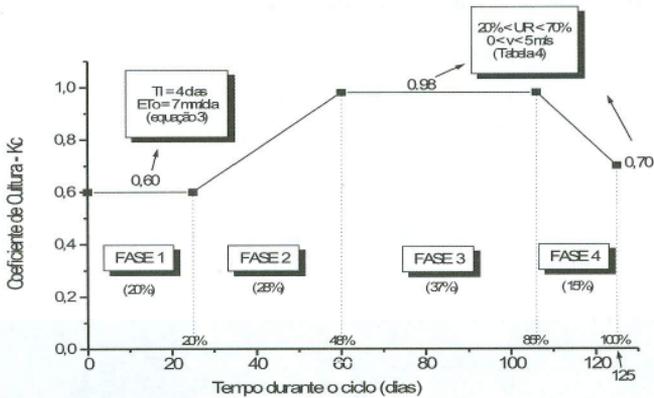
- (1) estágio inicial – que corresponde ao início do crescimento da cultura, quando a superfície do solo não está completamente coberta pela cultura (cobertura do solo < 10%);
- (2) estágio de desenvolvimento vegetativo – que corresponde de 10% até a 80% de cobertura do solo;
- (3) estágio de florescimento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

Os valores de  $k_c$  para os quatro estágios de desenvolvimento da cultura devem ser plotados como a Figura 3 exemplifica, para a cultura do melão. Para simplificação, os valores de  $k_c$  para essas quatro fases são representados como linhas retas.

Os passos necessários para obter os diferentes valores de  $k_c$  nos estágios são dados a seguir:

- a) estabelecer a data de plantio (ou semeadura) e informações locais do clima ou de regiões próximas de condições similares;
- b) determinar a duração total do ciclo de desenvolvimento e a duração de cada fase, a partir de informações locais (como referência, verificar a Tabela 5);
- c) estágio inicial (fase 1): prever o turno de irrigação ou de chuva; para um valor predeterminado de  $ET_o$ , obter o  $k_c$  oriundo da equação 3 e plotar o valor de  $k_c$  como está representado na Figura 3;
- d) estágio de desenvolvimento vegetativo (fase 2): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de  $k_c$  da Tabela 4 para a fase 3 e plotá-lo para a fase 2 como uma linha reta entre o valor da fase 1 e o da fase 3;
- e) estágio reprodutivo (fase 3): para uma conhecida condição de clima (umidade relativa e vento), selecionar o valor de  $k_c$  da Tabela 4 e assumi-lo como uma linha reta (valor constante) até o início da fase 4;
- f) estágio de maturação (fase 4): também obter o  $k_c$  da Tabela 4 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 3).



**Figura 3.** Exemplo da curva do coeficiente de cultura ( $k_c$ ) para o ciclo total de uma cultura de melão (ciclo completo com 125 dias), cujas divisões das fases e valores foram obtidos com o auxílio das Tabelas 4 e 5 e da equação 3.

## b) Cultura da Banana:

Os valores de  $k_c$  para a cultura da banana são dados na Tabela 6 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 que se a cultura estiver em solo nu e em regiões de chuvas freqüentes, os valores de  $k_c$  podem ser de 0,8 a 1,0 e a equação 3 pode ser utilizada.

## c) Cultura do Café:

Para a cultura do café, no caso de plantas adultas sem sombreamento em local limpo (sem plantas daninhas), o  $k_c$  pode ser considerado de 0,9 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 também consideram-se os valores para o café os mesmos adotados para citrus ou manga.

#### d) Cultura de Citrus e de Manga:

Os valores de kc para citrus incluem diferentes coberturas de solo, sendo em solo limpo ou sem controle de plantas daninhas (Tabela 7). Esses mesmos valores têm sido utilizados para a cultura da manga.

**Tabela 6.** Valores do coeficiente de cultura (kc) para a banana cultivada em clima tropical (Doorenbos e Pruitt, 1984).

Meses após o plantio:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kc:	0,4	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,85	1,0	1,1	1,1	0,9	0,8	0,8	0,95	1,05

**Tabela 7.** Valores do coeficiente de cultura (kc) para citrus<sup>1</sup> cultivados no hemisfério sul, em regiões predominantemente secas, com vento fraco a moderado (Doorenbos e Pruitt, 1984).

Mês:	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Pomar adulto com ≈70% cobertura												
Cultivo limpo	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,7	0,75	0,75	0,7	0,7	0,7	0,65
Sem controle <sup>2</sup>	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9	0,85	0,85	0,85	0,85
Pomar jovem com ≈50% cobertura												
Cultivo limpo	0,55	0,55	0,55	0,55	0,6	0,6	0,65	0,65	0,6	0,6	0,6	0,55
Sem controle <sup>2</sup>	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9	0,85	0,85	0,85	0,85
Pomar jovem com ≈20% cobertura												
Cultivo limpo	0,45	0,45	0,45	0,45	0,5	0,5	0,55	0,55	0,5	0,5	0,5	0,45
Sem controle <sup>2</sup>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1,0	1,0	0,95	0,95	0,95	0,95

<sup>1</sup>os valores desta tabela também têm sido usados para a cultura da manga

<sup>2</sup>cultivo sem controle de ervas daninhas

O efeito de ventos mais fortes é desprezado, tendo em vista que citrus têm bom controle de transpiração. Esse controle ou resistência estomática varia com a umidade relativa e temperatura do ar, ou seja, alta resistência sob condição quente e seca e baixa resistência sob condição mais úmida e fria. No entanto, os valores apresentados na Tabela 7 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 kc são assumidos de 20 a 50% mais baixos em relação à cobertura das árvores adultas. Sob chuva ou irrigações freqüentes, os valores para cultivo em solo limpo se aproximam daqueles com nenhum controle de plantas daninhas.

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

#### e) Cultura da Uva:

Os valores de kc para a cultura da uva podem variar consideravelmente, em função das práticas culturais, variedades,

**Tabela 8.** Valores do coeficiente de cultura (kc) para uva cultivada no hemisfério sul, em região predominantemente quente e seca e cobertura do solo na fase reprodutiva de 30-35%, sendo ainda sob cultivo limpo e vento fraco a moderado (Doorenbos e Kassam, 1994; Soares e Costa, 1998).

Mês:	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Idade cultura												
< 1 ano	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
1 a 2 anos	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,5	0,5

	Poda/floração	Flor./chumbinho	Des.fruto/matur.	Matur./colheita	Repouso fenol.
> 2 anos	0 a 25 dias	26 a 40 dias	41 a 100 dias	101 a 120 dias	0 a 60 dias
	0,4	0,5 a 0,6	0,7 a 0,85	0,7 a 0,5	0,5

espaçamento etc. As plantas cultivadas normalmente em solo limpo utilizam menos água do que qualquer outra cultura, devido às suas práticas culturais, 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 8 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%.

Por outro lado, no cultivo dito "em latada", que cobre completamente o solo, deverão ser adotados valores diferentes dos apresentados na Tabela 8, os quais serão maiores, segundo Soares e Costa (1998), que apresentam valores de  $k_c$  para diferentes percentuais de cobertura do solo.

#### **f) Cultura do Abacaxi:**

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.

### **2.3. Cálculo da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) irrigada por sistema localizado**

Foi visto, pela equação 2, o cálculo da ET<sub>c</sub>, que corresponde ao uso consuntivo estimado convencionalmente. Como também já foi visto, essa ET<sub>c</sub> pode ser estimada apenas a partir da evaporação da água do tanque Classe A, da seguinte forma:

$$ET_c = k_c \times k_t \times ECA \quad (4)$$

em que:

ET<sub>c</sub> = evapotranspiração da cultura ou uso consuntivo estimado convencionalmente (mm/dia);

$k_c$  = coeficiente da cultura (adimensional, Tabelas 4, 6, 7 e 8);

$k_t$  = coeficiente do tanque Classe A (adimensional, Tabela 2).

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 através da evaporação da superfície úmida do solo ou através da transpiração de vegetação indesejável (ervas daninhas).

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<sub>c</sub>) 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<sub>r</sub>) ou coeficiente de cobertura, da seguinte forma:

$$ET_{cl} = k_r \times ET_c \quad (5)$$

em que:

ET<sub>cl</sub> = evapotranspiração da cultura irrigada por sistema localizado (mm/dia);

k<sub>r</sub> = coeficiente de redução para irrigação localizada (adimensional, k<sub>r</sub> ≤ 1);

ET<sub>c</sub> = evapotranspiração da cultura estimada convencionalmente (mm/dia).

Se a estimativa da ET<sub>c</sub> for através do tanque Classe A, então a estimativa da ET<sub>cl</sub> fica:

$$ET_{cl} = k_r \times k_c \times k_t \times ECA \quad (6)$$

cujas variáveis e respectivas unidades já foram especificadas anteriormente.

Embora a estimativa precisa de k<sub>r</sub> necessite de uma investigação experimental mais profunda, pode-se utilizar uma das equações a seguir, propostas por alguns autores.

Keller e Karmeli (1974) propuseram:

$$k_r = C_s/85 \text{ ou } 1, \text{ assumindo o menor dos dois valores} \quad (7)$$

em que:

$k_r$  = coeficiente de redução (adimensional,  $k_r \leq 1$ );

$C_s$  = porcentagem da área superficial do solo coberta (projetada) pelas copas da cultura ao meio-dia solar (%).

Freeman e Garzoli, citados por Vermeiren e Jobling (1997), propuseram:

$$k_r = (C_s/200) + 0,5 \quad (8)$$

As variáveis e as unidades da equação 8 são as mesmas definidas para a equação 7. A equação 8 foi baseada na hipótese de que a evaporação na parte da superfície não coberta pela cultura está em torno de 50% da transpiração da cultura. Quando a cultura cobre todo o solo,  $k_r = 1$ . Quando não cobre mais do que uma pequena parte ( $C_s < 50\%$ ), recomenda-se tomar  $k_r = C_s/100$ , para evitar valores elevados do  $k_r$ .

Decroix, também citado por Vermeiren e Jobling (1997), propôs:

$$k_r = (C_s/100) + 0,1 \text{ ou } 1, \\ \text{assumindo o menor dos dois valores} \quad (9)$$

As variáveis e as unidades da equação 9 são as mesmas definidas para a equação 7. O termo 0,1 da equação 9 leva em consideração o efeito oásis, que é importante quando a porcentagem de cobertura é baixa. Essa equação dá resultados razoáveis, porém o coeficiente obtido deve ser usado com cautela e recomenda-se fazer ensaios diretos no campo para aferi-lo.

Uma relação mais recente é apresentada por Keller e Bliesner (1990):

$$k_r = 0,1 \times \sqrt{C_s} \quad (10)$$

Da mesma forma que as equações 7, 8 e 9, as variáveis e as respectivas unidades são idênticas também para a equação 10. A equação 10 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

**Tabela 9.** Valores de  $k_r$  sugeridos por vários autores (equações 7, 8, 9 e 10)

Cobertura do solo $C_s$ (%)	Valores de $k_r$ , segundo:			
	Keller e Karmeli (eq. 7)	Freeman e Garzoli (eq. 8)	Decroix (eq. 9)	Keller e Bliesner (eq. 10)
10	0,12	0,10	0,20	0,32
20	0,24	0,20	0,30	0,45
30	0,35	0,30	0,40	0,55
40	0,47	0,40	0,50	0,63
50	0,59	0,75	0,60	0,71
60	0,70	0,80	0,70	0,77
70	0,82	0,85	0,80	0,84
80	0,94	0,90	0,90	0,89
90	1,00	0,95	1,00	0,95
100	1,00	1,00	1,00	1,00

será maior que 0,1.ETc (ou 10% da evapotranspiração da cultura calculada no método convencional). Isso é considerado porque ocorre um efeito oásis (advecção) e alguma vegetação adicional comumente sempre cresce na área umedecida pelos emissores. No entanto, quando as copas da planta se desenvolvem até atingirem a cobertura plena ( $C_s = 100\%$ ) o  $k_r = 1$ .

A Tabela 9 apresenta os diferentes valores de  $k_r$  que resultam do cálculo das quatro equações apresentadas, segundo a porcentagem de cobertura do solo.

Pela Figura 4, pode-se demonstrar como se estima a porcentagem de cobertura ( $C_s$ ). Essa porcentagem é dada por:

$$C_s = (A_c/A_e) \times 100 \quad (11)$$

em que:

$C_s$  = porcentagem de cobertura (%);

$A_c$  = área da copa projetada sobre o solo ( $m^2$ );

$A_e$  = 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:

$$A_c = (\pi \times D_1 \times D_2) / 4 \quad (12)$$

em que:

$D_1$  = diâmetro maior da elipse projetada no solo (m);

$D_2$  = diâmetro menor da elipse projetada no solo (m).

A área dos espaçamentos é:

$$A_e = EL \times EP \quad (13)$$

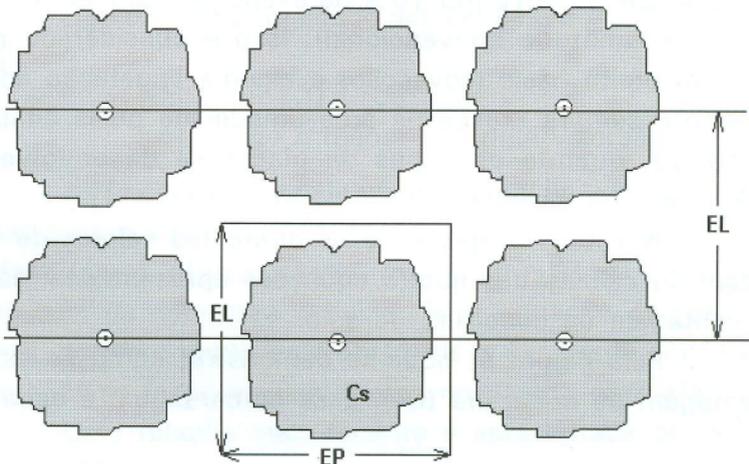
em que:

EL = espaçamento entre linhas de plantio (m);

EP = espaçamento entre plantas (m).

Substituindo as equações 12 e 13 na equação 11, então a  $C_s$  fica:

$$C_s = (25 \cdot \pi \times D_1 \times D_2) / (EL \times EP) \quad (14)$$



**Figura 4.** 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.

Um pomar maduro tem geralmente um valor máximo de Cs 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, Ac) e a quadrada (dos espaçamentos, Ae).

Alguns técnicos (IRRIGAÇÃO, s.d.) fazem uma correção para a área da copa (Ac) em função da relação entre o diâmetro e a altura da planta, conforme está apresentado na Tabela 10. Assim, por exemplo, se uma árvore tem a sua altura duas vezes maior do que o diâmetro, deverá ser multiplicado o fator de 1,08 sobre a área da sua copa (Ac).

**Tabela 10.** Valores do fator de correção para a área da copa (Ac) da cultura, em função da relação diâmetro:altura das plantas.

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

\* O fator de correção é multiplicado pela área da copa (Ac)

### 3. ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

Se houver água disponível no solo, o movimento de água prossegue da planta para a atmosfera. Não havendo água disponível, o movimento cessa. Quais serão então os níveis ótimos de água no solo? A procura desses níveis é que levou ao conceito de **Água Disponível**.

Além de outras importantes funções que o solo desempenha no sistema agrícola, ele é uma unidade armazenadora ou o reservatório de água para as plantas.

É um processo complexo o movimento da água do solo para a planta e desta para a atmosfera. Assim sendo, qualquer tentativa de quantificar a água disponível no solo não pode dar resultados universais. Por outro lado, existe a necessidade da definição da água disponível para a possibilidade de um manejo agrícola racional. Definiu-se, então, uma quantidade de água disponível baseada em variáveis mais simples de quantificar, desde que se conheçam suas limitações.

### 3.1. Capacidade de Campo (CC) ou Limite Superior de Água Disponível

O "reservatório" de água do solo é considerado 100% cheio quando sua umidade é a de saturação ao longo do perfil em consideração e é vazio quando o solo se encontra completamente seco.

Quando o solo está saturado, o potencial matricial ( $y_m$ ) é nulo e o perfil perde água por drenagem devido a variações do potencial gravitacional ( $y_g$ ) ao longo do perfil. Ao drenar, o perfil vai se tornando não saturado e a umidade diminui continuamente. Por isso, essa água que drena é denominada de água gravitacional. A velocidade da drenagem depende da condutividade hidráulica do solo e, em geral, é rápida para solos arenosos e lenta para solos argilosos. Como a drenagem se dá de cima para baixo, a distribuição de umidade no perfil de um solo homogêneo é tal que ela aumenta em profundidade. Com o passar do tempo, a variação no potencial matricial do solo vai aumentando até que esse se iguale à variação no potencial gravitacional. Nessa condição, a drenagem interna se reduz a valores desprezíveis, aí se diz que o solo está na capacidade de campo (CC). Este é o limite superior de água disponível.

Verificou-se que, na maioria dos solos e na maioria das situações, o solo se encontra na CC quando o  $y_m$  oscila na faixa de  $-1/10$  (solos arenosos) a  $-1/3$  atm (solos argilosos) (de  $-10$  a  $-30$  kPa, respectivamente).

A melhor forma de determinar a CC é no próprio local, onde a área é inundada e coberta com plástico para evitar a evaporação. A partir dos dias seguintes, amostras são coletadas diariamente até a profundidade desejada. No momento em que a taxa de drenagem interna for desprezível, esse será o valor da CC (Reichardt, 1987). Outro método menos preciso, mas aceito comumente na prática, é a determinação em laboratório com o equipamento utilizado para determinar a curva de retenção de água do solo. Para isso, usa-se o potencial matricial de  $-1/10$  ou  $-1/3$  atm ( $-10$  ou  $-30$  kPa) para essa determinação.

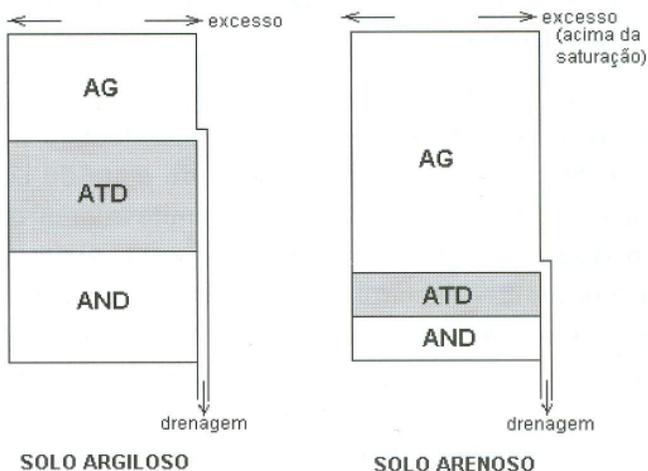
### **3.2. Ponto de Murcha Permanente (PMP) ou Limite Inferior de Água Disponível**

A partir do momento em que o solo não suprir mais a demanda de água pelo sistema planta-atmosfera, a planta entra em murcha. Isso significa que a reserva de água do solo está no fim ou que a demanda está muito alta. O limite inferior de umidade, no qual a reserva de água do solo se esgota, é denominado de ponto de murcha permanente (PMP). Esse ponto é mais difícil de ser determinado, pois ele envolve a condutividade hidráulica (K) do solo quando "bem" seco. A forma prática sugerida despreza a condutividade hidráulica e é feita com plantas de girassol que são submetidas a estresses hídricos até que elas não recuperem a turgidez, mesmo em ambiente com 100% de umidade relativa. Nessas condições, o solo se encontra no PMP. Foi verificado que esse valor está em torno de  $-15 \text{ atm}$  ( $-1500 \text{ kPa}$ ). Por isso, em laboratório, ele é determinado nesse potencial com o mesmo equipamento utilizado para determinar a curva de retenção.

### **3.3. Água Total Disponível (ATD)**

A água total disponível no solo (ATD) é definida como a água contida no solo que está entre a umidade da capacidade de campo (CC) e a umidade do ponto de murcha permanente (PMP). A Figura 5 mostra um esquema representativo para a ATD e outras formas de apresentação da água em solos argilosos e arenosos. Na referida figura também está representada a água gravitacional (AG), que é a água contida no solo entre a umidade de saturação e a umidade da CC, assim como também está esquematizada a água não disponível (AND), que é aquela que está contida entre o PMP e o solo completamente seco (umidade = 0).

A água gravitacional (AG) pode ser aproveitada pelas plantas enquanto permanecer na zona radicular, mas como ela drena rapidamente, em muitas situações ultrapassa a zona das raízes e se perde em horizontes mais profundos.



**Figura 5.** Proporções entre água gravitacional (AG), água total disponível (ATD) e água não-disponível (AND) para solos argiloso e arenoso.

A curva de retenção da água no solo (um modelo é exemplificado na Figura 6) auxilia bastante a definição da Água Total Disponível (ATD).

Na maioria das situações, a ATD de um solo não é conhecida, nesses casos pode-se estimá-la, de modo menos preciso, por meio dos valores constantes na Tabela 11, desde que conheça ou se tenha noção da textura do solo.

A utilização da Tabela 11 requer um certo cuidado, principalmente em solos que têm características físico-hídricas diferentes da regra geral para a textura. Por exemplo, os latossolos encontrados nos cerrados normalmente possuem textura fina, esses se comportam como solos de textura grossa (ATD entre 80 e 100 mm/m), em função da presença de óxidos de ferro que favorecem a formação de agregados pequenos, bastante estáveis, de comportamento semelhante ao da areia (Resende et al., 1995).

A água total disponível pode, então, ser representada pela equação:

$$ATD = (CC - PMP) \cdot 10 \quad (15)$$

em que:

ATD = água total disponível no solo (mm de água/cm de solo);

CC = umidade do solo na capacidade de campo ( $m^3/m^3$  ou  $cm^3/cm^3$ );

PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente ( $m^3/m^3$  ou  $cm^3/cm^3$ );

10 = constante necessária para conversão de unidades.

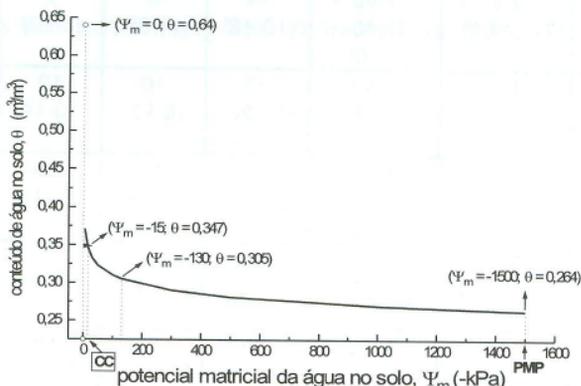


Figura 6. Curva de retenção da água no solo, para o perfil 0-90 cm do Latossolo Vermelho-Escuro da área experimental da Embrapa Milho e Sorgo (Albuquerque, 1995).

É comum os resultados provenientes dos laboratórios virem expressos em %peso para CC e PMP, como se apresentam na Tabela 3, então a equação 5 pode ser escrita de outra forma:

$$ATD = \frac{(CC - PMP)}{10} \times d \quad (16)$$

em que:

ATD = água total disponível no solo (mm de água/cm de solo);

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

PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente (%peso);

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

10 = constante necessária para conversão de unidades.

**Tabela 11.** Valores aproximados para algumas características físico-hídricas dos solos, segundo a sua classe textural (Vermeiren e Jobling, 1997)

Textura do solo	VIB <sup>1</sup> cm/h	Densidade g/cm <sup>3</sup>	CC <sup>2</sup> %peso	PMP <sup>3</sup> %peso	ATD <sup>4</sup> %peso	ATD <sup>5</sup> 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)

<sup>1</sup> VIB = velocidade de infiltração básica. Primeiro valor representa a média e os valores entre parênteses representam a faixa de variação.

<sup>2</sup> CC = umidade do solo na capacidade de campo

<sup>3</sup> PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente

<sup>4</sup> ATD = água total disponível = (CC - PMP)

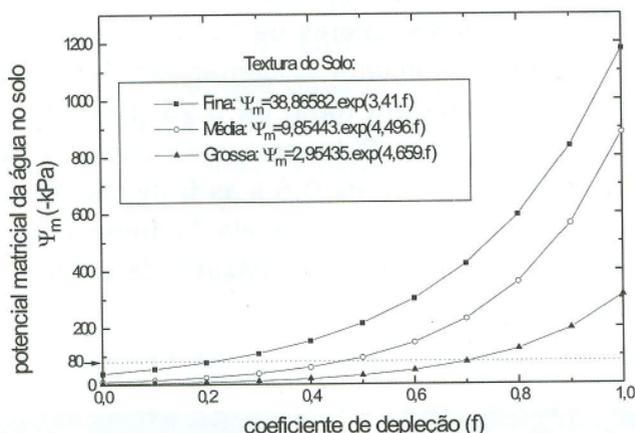
<sup>5</sup> ATD em lâmina de água por profundidade de solo

### 3.4. Água Facilmente Disponível (AFD)

A água total disponível (ATD), como já foi visto, depende da textura e da estrutura do solo; portanto, é variável com o tipo de solo. Apesar do conceito de ATD 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 6), à medida que há extração de água pelo sistema radicular das plantas, o potencial da água no solo aumenta e a água restante torna-se mais difícil de ser retirada, tendo em vista estar retida a uma maior sucção.

A Figura 7 mostra as curvas do coeficiente de depleção (f) da água no solo em função do potencial matricial ( $y_m$ ) 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. 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 ATD em solo de textura grossa (arenosos) está retida no potencial maior que  $-100$  kPa, enquanto que em solos de textura fina (argilosos) a maior parte está retida em potenciais bem menores do que  $-100$  kPa.



**Figura 7.** Coeficiente de depleção ( $f$ ) da água no solo em função do potencial matricial da água no solo, para solos de diferentes texturas (dados adaptados de Grattan et al., 1989).

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 ATD 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.

Então, a AFD é definida como:

$$AFD = f \times ATD \quad (17)$$

em que:

- AFD = água facilmente disponível (mm/cm de solo);  
f = coeficiente de disponibilidade ou de depleção da água no solo (adimensional,  $0 < p < 1$  – Tabela 12);  
ATD = água total disponível (mm/cm de solo).

O coeficiente f estabelece o ponto da água no solo em que não haverá perda de rendimento da cultura proveniente da demanda evaporativa. Assim, maior demanda evaporativa normalmente exigirá menores valores de f e vice-versa.

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 0,5 e as fruteiras perenes, em 0,4 (Doorenbos e Kassam, 1979). A Tabela 12 fornece valores de f de acordo com a evapotranspiração máxima da cultura, com o respectivo grupo a que pertence.

**Tabela 12.** Coeficiente de depleção (f) da água no solo para grupos de cultura e evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>) (Doorenbos e Kassam, 1979).

Grupo de Cultura <sup>1</sup>	ET <sub>m</sub> (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	

<sup>1</sup> 1 – cebola, pimentão, batata; 2 – banana, repolho, uva, ervilha, tomate; 3 – alfafa, feijão, citrus, amendoim, abacaxi, girassol, melancia, trigo; 4 – algodão, milho, azeitona, açafraão, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar, fumo.

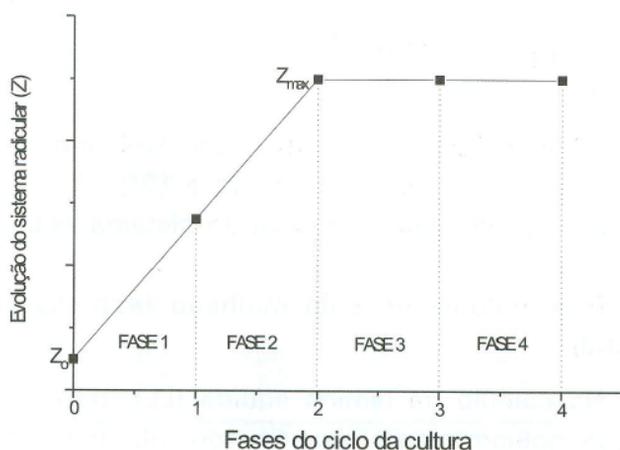
### 3.5. Profundidade Efetiva do Sistema Radicular (Z)

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z) pode ser estimada, para algumas culturas, pela Tabela 13. Obviamente, nessa tabela estão os valores após a cultura ter atingido o seu pleno desenvolvimento; na fase inicial, esses valores devem ser estimados menores, pois o sistema radicular está se desenvolvendo.

**Tabela 13.** Profundidade efetiva média ( $Z$ ) do sistema radicular de algumas culturas (Arruda et al., 1987, e Brasil, 1986, citados por Moreira, 1993).

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

É óbvio, 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. Pode ser considerado que o seu desenvolvimento é linear a partir da profundidade de semeadura até atingir a fase 3, como está representado na Figura 8.



**Figura 8.** 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 para o sistema radicular (Z), pode ser que na realidade esse esteja mais raso ou mais profundo. Assim, pode-se enfatizar o seguinte:

- a) se o Z estiver, na realidade, mais raso, supondo que esteja mais profundo – isso significa que o solo na zona radicular ficará seco por mais tempo, com irrigações menos freqüentes;
- b) se o Z estiver, na realidade, mais profundo, supondo que esteja mais raso – isso significa que o solo na zona radicular permanecerá sempre úmido, com irrigações mais freqüentes.

## 4. LÂMINA LÍQUIDA E TURNO DE IRRIGAÇÃO

### 4.1. Lâmina Líquida (LL)

Na irrigação convencional, a lâmina líquida (LL) de água que se adiciona ao solo umedece todo o volume do solo na zona das raízes. Porém, na irrigação localizada, considerando o fato de que só uma parte do volume do solo é umedecido, a LL fica expressa:

$$LL = \frac{AFD \times Z \times P}{100} \quad (18)$$

em que:

AFD = água facilmente disponível (mm de água/cm de solo – Tabelas 11 e 12);

Z = profundidade efetiva do sistema radicular (cm – Tabela 13);

P = volume do solo molhado (expresso em % do volume total).

No cálculo da lâmina líquida (LL), para sistemas de irrigação que molham toda a superfície do solo, como os sistemas de aspersão, o valor de P da equação 15 é 100%. Entretanto, o sistema de irrigação localizada molha apenas fração da superfície do solo ( $P < 100\%$ ) num padrão de umedecimento que depende da textura do solo, da permeabilidade horizontal e vertical, da sucção capilar, da presença ou ausência de camadas impermeáveis,

do volume de água aplicado, da vazão do emissor e da umidade inicial do solo.

A equação 18 pode ser usada tanto para fazer o manejo quanto para o dimensionamento do sistema de irrigação, desde que se considere o valor de  $P$  como a condição mais crítica da irrigação para esse último caso (adota-se o máximo valor que o  $P$  pode assumir).

#### 4.2. Medição ou Estimativa da Porcentagem de Solo Molhado ( $P$ )

Em solos com textura fina (argilosos ou siltosos), as forças capilares são fortes e a força gravitacional pode ser quase desprezada. Nesses solos, o padrão de infiltração tem uma forma de bulbo, com um umedecimento lateral às vezes maior que o vertical. Em solos arenosos profundos, as forças capilares são fracas e a força gravitacional tem uma influência muito mais pronunciada. A componente vertical do fluxo é maior, enquanto que a componente horizontal é menor, o que faz com que a forma do bulbo seja mais alongada no sentido vertical. Em solos de textura franca, com horizontes superiores arenosos e inferiores argilosos, o bulbo tem uma pequena forma de pera (Figura 9).

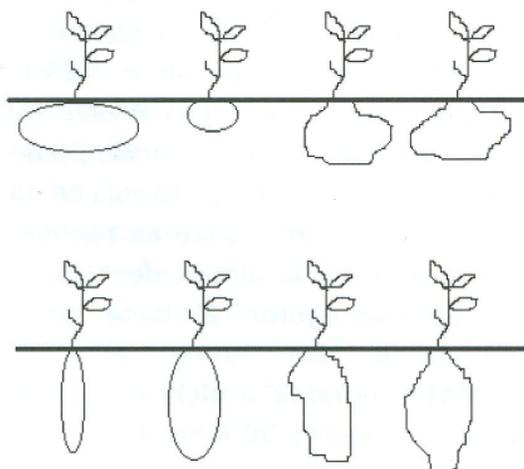


Figura 9. Padrões de infiltração de água no solo.

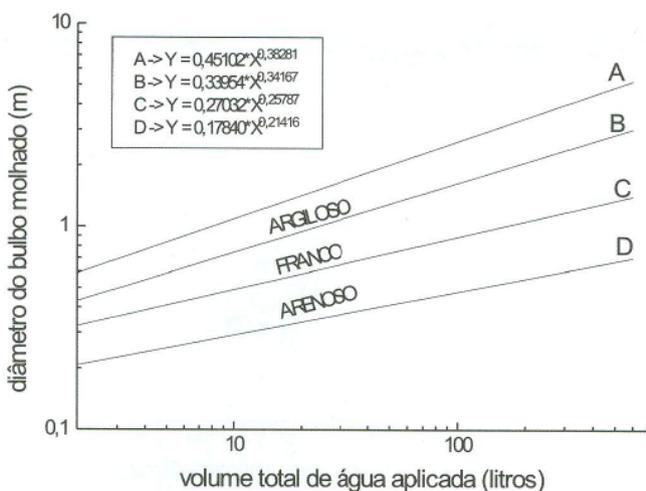
Muitos pesquisadores têm estudado modelos para calcular o padrão de distribuição em função das propriedades físicas dos solos. Os métodos são complicados, trabalhosos e os resultados pouco confiáveis, dada a heterogeneidade dos solos.

É muito difícil fazer previsão sobre o padrão de distribuição de água no solo. Portanto, é aconselhável utilizar ensaios de campo ou métodos empíricos, até que se tenha desenvolvido métodos de cálculo matemático mais fáceis e confiáveis. No manual 36 dos *Estudos FAO em Irrigação e Drenagem* (Vermeiren e Jobling, 1997), há uma descrição para fazer medições no campo visando obter a distribuição de água no solo.

Com a ajuda de ábacos, como os das Figuras 10 e 11, pode-se determinar a extensão do bulbo úmido. Deve-se considerar, no entanto, que esses ábacos foram obtidos a partir de um número limitado de ensaios de campo. Portanto, os valores obtidos devem ser utilizados com cuidado e como uma primeira aproximação.

Como já se comentou, o valor de P depende do tipo de solo, da vazão e do espaçamento dos emissores sobre as tubulações laterais e da distância entre essas.

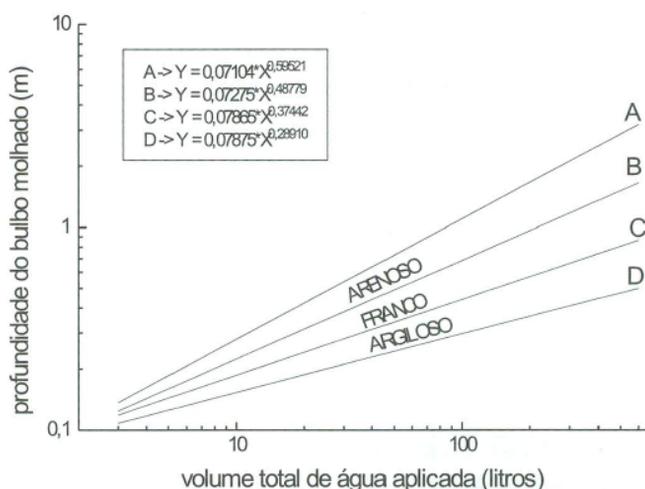
Não se tem estabelecido um volume mínimo para P. Já se demonstrou que mesmo que se aplique um volume referente à quarta parte do sistema radicular ( $P = 25\%$ ) maçãs jovens continuam crescendo normalmente. Um valor de 50% parece ser suficiente. Uma média razoável para o cálculo de um projeto é umedecer pelo menos  $1/3$  ( $P = 33\%$ ) do volume da zona radicular potencial, no caso de um pomar onde as plantas estejam muito espaçadas. Se as plantas estão juntas, deve-se umedecer todo o volume do solo para assegurar a cada planta água em quantidade suficiente. Em uma área com chuvas intermitentes intensas durante o ciclo e onde a irrigação tem caráter complementar, P igual a 20% parece ser uma base razoável de cálculo.



**Figura 10.** Guia que permite calcular aproximadamente o diâmetro do bulbo molhado em função do volume total aplicado por irrigação, para solos de diferentes texturas.

No caso de culturas anuais em fileiras, deve-se umedecer uma faixa de solo que possa beneficiar uma ou duas fileiras. Se os emissores estão espaçados a 0,8 ou 0,9 vezes o diâmetro horizontal do bulbo, então de 90 a 95% da faixa estarão umedecidos e a largura mínima da zona molhada será de aproximadamente 90% da largura total da faixa.

Keller e Karmeli (1974) desenvolveram um guia para a estimativa de porcentagem do volume umedecido (P). Os valores propostos figuram na Tabela 14 e permitem calcular o valor de P no caso de tubulações laterais isoladas, em linhas retas e eqüidistantes, equipadas com emissores uniformemente espaçados, para distintas vazões e solos de texturas grossa, média ou fina. O espaçamento entre emissores indicado na Tabela 14 permite ter uma faixa contínua de solo umedecido de largura uniforme, de aproximadamente 30 cm, abaixo da superfície do solo. Os valores indicados são válidos para condições médias, quando se aplicam aproximadamente 40 mm de lâmina por irrigação.



**Figura 11.** Guia que permite calcular aproximadamente a profundidade do bulbo molhado em função do volume total aplicado por irrigação, para solos de diferentes texturas.

Para utilizar a Tabela 14, entra-se na coluna da esquerda com o espaçamento entre tubulações laterais, encontrando-se os valores de P a partir das distintas combinações entre tipo de solo e vazão do emissor, para uma das quais está indicado o espaçamento entre tubulações laterais que resulte numa faixa umedecida contínua.

Quando a irrigação é efetuada mediante pequenas lâminas, deve-se utilizar a Tabela 14 com um valor que seja a metade da vazão real dos emissores. Inversamente, quando existem camadas de argilas, de areia ou outras discontinuidades no perfil do solo que aumentem a componente horizontal da infiltração, deve-se utilizar a Tabela 14 para uma vazão que pode ser até duas vezes a vazão real.

Os valores da Tabela 14 são válidos para calcular P no caso de uma tubulação lateral isolada, reta e equipada com emissores uniformemente espaçados, como está na Figura 12.

**Tabela 14.** Guia para determinar percentagem de solo molhado (P) (Keller e Karmeli, 1974)

Espaçamen- to entre tubula- ções laterais	Vazão dos emissores														
	< 1,5 ?/h			2,0 ?/h			4,0 ?/h			8,0 ?/h			> 12 ?/h		
Espaçamento recomendado para os emissores na tubulação lateral (Sd), em m															
Em solos de textura grossa (G), média (M) e Fina (F)															
SI	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
(m)	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1,0	0,6	1,0	1,3	1,0	1,3	1,7	1,3	1,6	2,0
Porcentagem de solo umedecido P (%)															
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,0	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2,0	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3,0	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4,0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53
5,0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,0	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

\* Para o caso de uma tubulação lateral retilínea equipada com emissores uniformemente espaçados que aplicam uma lâmina de 40 mm por turno de irrigação sobre toda a superfície.

Às vezes, utilizam-se duas tubulações laterais por fileira ou os emissores se concentram próximos das plantas, em lugar de tê-los uniformemente distribuídos na tubulação lateral. Para tal (Figura 13), os valores de P, obtidos da Tabela 14, devem ser ajustados de acordo com a seguinte fórmula:

$$P = \frac{P_1 \times S_1 + P_2 \times S_2}{S_r} \quad (19)$$

em que:

$S_r$  = espaçamento entre fileiras de planta;

$S_1$  = espaçamento interno (entre as duas tubulações laterais de uma fileira) que se deve tornar igual ao valor  $S_1$  da Tabela 14, que corresponde a  $P = 100\%$  para os diferentes dados (vazão e espaçamento dos emissores, tipo de solo);

$S_2$  = espaçamento maior entre laterais ( $S_2 = S_r - S_1$ );

$P_1$  = valor de P na Tabela 14, com  $S_1 = S_1$ ;

$P_2$  = valor de P na Tabela 14; com  $S_1 = S_2$ .

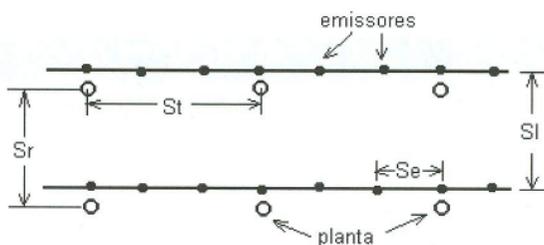


Figura 12. Irrigação localizada com apenas uma tubulação lateral por fileira.

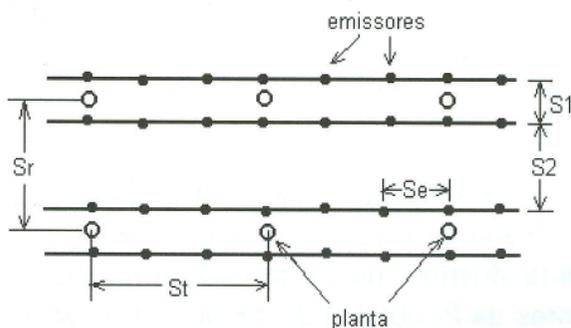


Figura 13. Irrigação localizada com duas tubulações laterais por fileira.

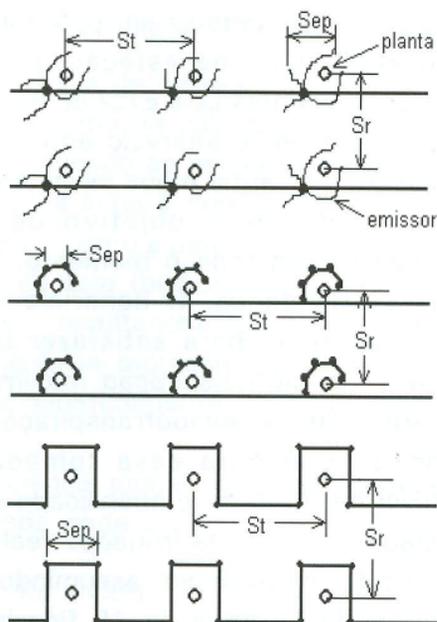
Há casos (Figura 14) em que se pode ter emissores com várias saídas ou vários emissores concentrados com uma só saída nas tubulações laterais (chamadas com prolongamento com multi-saída), ou também numa tubulação lateral única, disposta em ziguezague. Emprega-se então a seguinte fórmula:

$$P = 100 \times \frac{n \times S_{pd} \times S_h}{S_a \times S_r} \quad (20)$$

em que:

- $n$  = número de pontos ou de emissores por planta;
- $S_{pd}$  = distância entre os emissores próximos da mesma planta;

- $S_h$  = largura da faixa úmida, correspondente à mesma definição de  $S_l$  da equação 19;  
 $S_r$  = espaçamento entre fileiras de plantas;  
 $S_a$  = espaçamento entre plantas nas fileiras.



**Figura 14.** Irrigação localizada com emissores com várias saídas, com prolongamento de multi-saídas e laterais em ziguezague.

### 4.3. Turno de Irrigação (TI)

Conhecendo-se a necessidade de água em qualquer período da cultura, que pode ser obtida da equação 6, para o caso específico da irrigação localizada, e a lâmina líquida (equação 18), facilmente pode-se obter o turno de irrigação (intervalo entre irrigações) para o período considerado a partir da relação:

$$TI = \frac{LL}{ETcl} \quad (21)$$

em que:

TI = turno de irrigação (dias);

LL = lâmina líquida de irrigação (mm - equação 18);

ET<sub>cℓ</sub> = evapotranspiração ou uso consuntivo da cultura em irrigação localizada (mm/dia – equação 6).

Para propósitos de projeto, a ET<sub>cℓ</sub> da cultura madura (cobertura do solo C<sub>s</sub> máxima esperada) poderia ser usada para dimensionamento do sistema. Porém, em determinadas fases da cultura ou mesmo em função da estação do ano de menor demanda hídrica, os componentes LL e ET<sub>cℓ</sub> da equação 21 podem mudar, fazendo variar também o intervalo entre irrigações.

Outro aspecto a levantar é que os sistemas de irrigação não são dimensionados com o objetivo de permitir uma evapotranspiração máxima em todo o momento. Por outro lado, a cultura não deve sofrer danos. O benefício ótimo é obtido quando se projeta o sistema para satisfazer uma proporção suficientemente alta da evapotranspiração máxima. Atualmente, distribuições de frequência de evapotranspiração máxima têm sido usadas como critério para essa tomada de decisão, considerando um nível de 75% de probabilidade de ocorrência.

Na realidade, o turno de irrigação real a ser usado é uma decisão do manejo. Por exemplo, assumindo um turno fixo de 1 dia, a lâmina líquida da equação 18 fica igual à ET<sub>cℓ</sub> da equação 6, simplificando o processo de dimensionamento e de manejo.

## 5. LÂMINA BRUTA DE IRRIGAÇÃO (LB)

A lâmina bruta de irrigação é baseada na lâmina líquida de irrigação, eficiências do sistema e na necessidade de lâminas extras de lixiviação, para um controle de salinização, por exemplo.

Desse modo, a lâmina bruta (LB) é dada por:

$$LB = \frac{LL}{E_f} + L_r \quad (22)$$

em que:

LB = lâmina bruta de irrigação (mm);

LL = lâmina líquida de irrigação (mm – equação 15);

Ef = eficiência de irrigação (adimensional,  $0 < Ef < 1$ );

Lr = lâmina complementar necessária para lavagem do solo (mm).

### 5.1. Eficiência de Irrigação (Ef)

A eficiência de irrigação localizada é basicamente uma função da uniformidade de aplicação, mas também depende de: *Perdas menores* – devido ao escoamento superficial, vazamentos, fluxos no filtro e na linha e drenagem;

*Perdas inevitáveis* – como a percolação profunda, devido ao padrão de molhamento do solo (bulbo) e chuva fora de época;

*Perdas evitáveis* – resultantes de programação inadequada.

A eficiência representa a porcentagem bruta da água aplicada, que é benéficamente utilizada para o uso consuntivo da cultura.

A eficiência global de aplicação de água na parcela na irrigação localizada pode ser definida como:

$$Ef = K_s \times \text{CUIL} \quad (23)$$

em que:

Ef = eficiência de irrigação global (adimensional,  $0 < Ef < 1$ );

$K_s$  = representa a razão entre a média da água armazenada no sistema radicular e a média da água aplicada (adimensional,  $0 < K_s < 1$ );

CUIL = coeficiente de uniformidade na irrigação localizada (adimensional,  $0 < \text{CUIL} < 1$ ).

O  $K_s$  expressa a eficiência do solo em armazenar água e leva em consideração as perdas inevitáveis (percolação profunda e outras). O CUIL expressa a uniformidade de aplicação de água pelos emissores.

O valor de  $K_s$  depende da maneira como se realiza a irrigação (programação lâmina-freqüência), uma vez que a irrigação localizada deve abolir ou minimizar a perda por percolação profunda. No entanto, em solos muito permeáveis e com baixa capacidade de retenção de água, essas perdas podem ocorrer ou ser mais elevadas. A Tabela 15 apresenta algumas sugestões para o  $K_s$ , segundo a textura do solo.

**Tabela 15.** Valores do coeficiente  $K_s$  (eq. 23) para solos de diferentes texturas.

Textura do Solo	$K_s$
Muito Grossa	0,87
Grossa	0,91
Média	0,95
Fina	1,0

Na primeira aproximação, alguns autores sugeriram fixar em 10% da lâmina líquida a quantidade de água complementar que se necessita para a lavagem e as perdas inevitáveis por percolação profunda. Isso se faz com a equação para lâmina bruta (equação 22) seja:

$$LB = \frac{1,1 \times LL}{CUIL} \quad (24)$$

## 5.2. Coeficiente de Uniformidade em Irrigação Localizada (CUIL)

Em irrigação localizada, a água é transportada por uma rede de tubulações, sob pressão, até um ponto onde se infiltra no solo. A uniformidade de aplicação da água às plantas depende totalmente da uniformidade de distribuição, ou melhor, da variação relativa das vazões distribuídas. A variação da vazão entre os emissores é uma função das variações da pressão da rede, assim como das características próprias dos emissores.

O objetivo essencial do projeto de uma rede de irrigação localizada é de abastecer adequadamente as plantas. Portanto, é importante para a uniformidade de aplicação a relação entre a vazão mínima e a máxima entregue pelos emissores ao conjunto

da rede. Esta relação se expressa pelo coeficiente de uniformidade (CUIL).

Infelizmente, não é prático conhecer todas as variáveis que interferem no cálculo da uniformidade dos emissores. Esses fatores podem ser entupimentos parciais, variações na temperatura da água, idade dos emissores etc. Mas é possível analisar um projeto e estimar satisfatoriamente as variações na vazão dos emissores que tais fatores podem causar. Porém, os outros itens podem ser conhecidos. O fabricante poderia fornecer informações sobre a relação da pressão com a vazão de emissão e também sobre a variabilidade de fabricação para o emissor. Dados topográficos do local selecionado e a análise hidráulica do sistema proposto podem fornecer a informação necessária acerca das variações esperadas na pressão.

O conceito básico e fórmulas usadas para a determinação do coeficiente de uniformidade foram inicialmente publicados por Keller e Karmeli (1974). A base das fórmulas propostas por esses autores é a relação entre a vazão mínima do emissor e a vazão média. Esse processo trata a vazão de emissão abaixo da média como sendo mais importante do que a superior à média. A razão para isso é porque, na irrigação localizada, a água é aplicada em pouca quantidade somente para uma parte do sistema radicular da planta. Dessa forma, é mais importante considerar a subestimativa na aplicação de água do que a superestimativa.

Para a estimativa do coeficiente de uniformidade dos emissores, a seguinte equação foi proposta por Keller e Karmeli (1974):

$$CUIL = 100 \times \left( 1 - 1,27 \times \frac{v}{\sqrt{Ne}} \right) \times \frac{q_{\min}}{q_{\text{med}}} \quad (25)$$

em que:

CUIL = coeficiente de uniformidade de aplicação em irrigação localizada (%);

v = coeficiente de fabricação do emissor, que é fornecido pelo fabricante;

Ne = número de emissores por planta;

$q_{\min}$  = vazão mínima dos emissores, calculada a partir da curva da vazão nominal x pressão (litros/h);

$q_{\text{med}}$  = vazão média dos emissores (litros/h).

O coeficiente de fabricação do emissor (v) representa o desvio padrão da vazão da população de emissores em relação à vazão média, ou seja:

$$v = \frac{\sqrt{(q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \dots + q_n^2 - n \cdot q_{\text{med}}^2) / (n - 1)}}{q_{\text{med}}} \quad (26)$$

em que:

$q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$  = são vazões individuais de cada emissor (L/h);

n = número de emissores da amostra;

$q_{\text{med}}$  = vazão média dos emissores da amostra (L/h) =  $(q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n) / n$ .

A constante 1,27 na equação 25 corresponde à média do quarto inferior das vazões e tem significado prático de que os 80% dos emissores satisfazem as condições de uniformidade assim definidas. Pode-se também elevar aquele fator ao valor 1,96, o que significa que os 95% dos emissores satisfazem essas condições. De modo geral, recomenda-se ter um CUIL superior a 94% e que, em nenhum caso, CUIL seja inferior a 90%.

## 6. VAZÃO POR EMISSOR OU POR GRUPO DE EMISSORES

### 6.1. Duração de Irrigação (h)

O sistema mais econômico será aquele projetado com uma duração de aplicação tão longa quanto possível, mantendo vazões pouco elevadas em toda a rede. No entanto, existem várias limitações da duração máxima da irrigação. Por exemplo, em solo de textura muito grossa e com capacidade muito baixa de retenção de água, deve-se irrigar quando a planta necessita, aproximando-se ao máximo da curva de consumo, a fim de evitar perdas por percolação profunda. Na maioria das vezes, nesse tipo de solo, a irrigação deve ser efetuada diariamente (TI = 1 dia), em intervalo

que vai das 9:00 até às 15:00 h ou mais, com uma duração total em torno de seis horas.

Fora desse caso particular, a duração da aplicação dependerá do calendário de irrigação global adotado e do coeficiente de segurança da rede. Assim, tem-se que se dispor de uma margem para prevenir uma subestimativa das necessidades das culturas, necessidades máximas anormais, interrupções e manutenção, incluindo uma pequena diminuição ao longo do tempo da vazão média dos emissores.

Para se levar em consideração esses fatores, é melhor alterar a duração da aplicação sem modificar a hidráulica do sistema. Como primeira aproximação, parece que a duração máxima de aplicação, baseada em proporcionar água às plantas no momento propício, permitindo um fator adequado de segurança, é de 6 a 8 horas por dia, em solos de textura grossa, e de 10 a 18 horas por dia, em solos com boa capacidade de retenção de água. No entanto, no período máximo, a duração pode chegar a 20 ou 22 horas por dia. O projetista deve considerar a vazão do sistema, tendo em vista que a vazão e a duração de irrigação são inversamente proporcionais, sendo o seu produto igual às necessidades totais de irrigação.

## 6.2. Cálculo da Vazão do Emissor ( $Q_e$ )

Uma vez determinada a lâmina a ser aplicada por irrigação para uma frequência escolhida, assim como a duração de aplicação, deduz-se aritmeticamente a vazão por emissor ou grupo de emissores pela seguinte fórmula:

$$Q_e = \frac{LB \times A}{t} = \frac{LB \times S_d \times S_l}{t} \quad (27)$$

em que:

$Q_e$  = vazão do emissor ou do grupo de emissores (litros/h);

LB = lâmina bruta de irrigação para toda a superfície e para o turno considerado (mm);

t = tempo em que cada emissor é operado, isto é, duração da irrigação (h);

$A$  = área total irrigada por cada emissor ( $m^2$ );

$S_d, S_l$  = espaçamento dos emissores na tubulação lateral e entre laterais, respectivamente (m).

O número de emissores por planta deve ser determinado para obter um modelo apropriado de distribuição de água no solo. Em caso de não existirem dados reais (de teste ou experimentais), pode-se utilizar a Tabela 14.

Na escolha do local para a descarga do emissor, deve-se tomar cuidado de evitar pontos que possam causar qualquer acumulação ou percolação profunda.

Na prática, as vazões dos emissores variam entre aproximadamente 2 a 50 litros/h.

## 7. EXEMPLO DE CÁLCULO

Determinar a vazão de um emissor ( $Q_e$ ) combinado com o tempo de funcionamento ( $h$ ) de um sistema de irrigação por gotejamento que será usado para uma cultura do melão, cuja duração completa do ciclo é de 140 dias.

Calcular essa vazão para realizar o manejo da irrigação na fase 1 do ciclo da cultura e também a vazão para o dimensionamento do sistema.

### Dados:

Esquema de operação de campo semelhante ao da Figura 12 (com apenas uma tubulação lateral por fileira de plantio).

Espaçamento entre plantas ( $S_t$ ) = 0,8 m.

Espaçamento entre fileiras de plantas ( $S_l$ ) = 2,0 m

Espaçamento entre emissores ( $S_e$ ) = 0,8 m (1 emissor/planta).

Umidade relativa média do ar (UR) na fase 1 = 60%.

UR no período crítico = 30%.

Velocidade média do vento diária ( $v$ ) na fase 1 = 1,2 m/s.

$v$  no período crítico = 2,1 m/s.

Evaporação média diária de água do tanque Classe A (ECA) na fase 1 = 6 mm/dia. Tanque exposto sobre grama com bordadura de 10 m (R = 10 m).

ECA no período crítico = 9,8 mm/dia.

Turno de irrigação (TI) na fase 1 = 2 dias.

Solo (de textura média) com água total disponível (ATD) = 0,6 mm/cm de solo (6%).

Profundidade de sementeira (Zo) = 5 cm.

Coefficiente de uniformidade da irrigação localizada (CUIL) = 90%.

Resposta:

Colocaremos os passos para a resolução na forma de tabela, de acordo com a seqüência de variáveis necessárias.

O período crítico corresponde à fase 3 do ciclo da cultura (Doorenbos e Pruitt, 1984). Então, todas as variáveis a serem obtidas se relacionarão com essas duas fases.

Fase	kt (1)	ET <sub>o</sub> (2) mm/dia	kc (3)	duração da fase (4) - dias	ET <sub>c</sub> (5) mm/dia	kr (6)	ET <sub>cλ</sub> (7) mm/dia	f (8)	AFD(9) mm/cm
1	0,75	4,5	0,88	28	3,96	0,63	2,5	0,60	0,36
3	0,60	5,88	0,98	52	5,76	1,0	5,8	0,45	0,27

Fase	Z (10) cm	P (11) %	TI (12) dias	LL (13) mm	LB (14) mm	h (15) horas	Q <sub>e</sub> (16) litros/h	Vol. p/ir-rig. (17) litros	f <sub>cor.</sub> (18)
1	15	12*	2	5	6,1	8	1,22	9,76	0,56
3	30	15*	1	5,8	7,1	8	1,42	11,36	0,32

1. coeficiente de tanque (Tabela 2)
2. evapotranspiração de referência (equação 1) =  $kt \times ECA$
3. coeficiente da cultura – fase 1 (equação 3,  $ET_o = 4,5$  mm/dia e  $TI = 2$  dias); fase 3 (Tabela 4,  $UR = 30\%$  e  $v = 2,1$  m/s)
4. Tabela 5 – fase 1 (20% de 140 dias) e fase 3 (37% de 140 dias)
5. evapotranspiração da cultura (equação 2) =  $kc \times ET_o$

6. coeficiente de redução para irrigação localizada (equação 10 ou Tabela 9) – fase 1 ( $0,32 < k_r < 0,63$ ;  $10\% < C_s < 40\%$ ) e fase 3 ( $C_s = 100\%$  e  $k_r = 1$ ). Na fase 1 será usada a condição mais crítica, ou seja,  $k_r = 0,63$ .
7. evapotranspiração da cultura para irrigação localizada (equação 5) =  $k_r \times k_c \times k_t \times ECA$
8. coeficiente de disponibilidade ou de depleção recomendável (Tabela 12) – o melão pertence ao grupo 3 das culturas listadas na Tabela 12
9. água facilmente disponível (equação 17) =  $f \times ATD$
10. profundidade efetiva do sistema radicular – fase 1 (Figura 8,  $5 < Z < 15$  cm) e fase 3 (Tabela 13)
11. percentual do volume de solo molhado – deve ser determinado através de testes no próprio local da cultura, mas pode-se utilizar auxílio das Figuras 10 e 11 e Tabela 14. Mas como P é função de  $Q_e$  (vazão do emissor) haverá a necessidade de simular por *tentativa e erro* até se encontrar o valor correto. Entretanto, seu valor pode ser obtido de modo inverso ao se fixar o turno de irrigação. \*Valores aproximados obtidos posteriormente de modo inverso, através das Figuras 10 e 11, em função do volume de água aplicado por irrigação (coluna 17)
12. turno de irrigação – os valores foram fixados – fase 1 (2 dias) e fase 3 (1 dia)
13. lâmina líquida de irrigação – obtida de modo inverso a partir da equação 21 –  $LL = ETc_l \times TI$
14. lâmina bruta de irrigação (equação 24)
15. duração da irrigação – os valores foram estipulados em 8 horas
16. vazão de cada emissor (equação 27)
17. volume de água suprida à cultura por emissor em cada irrigação
18. coeficiente de disponibilidade corrigido em função do TI fixo. É obtido por inverter a equação 18 sem o valor de P, pois é considerado um valor médio para todo o volume de solo, não somente o volume molhado –  $f = [LL/(ATD \times Z)]$

## 8. AGRADECIMENTOS

Ao pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo *Camilo de Lelis Teixeira de Andrade* e ao pesquisador da Epamig – CTNM *Édio Luiz da Costa* as sugestões feitas e o auxílio na obtenção de alguns dados.

## 9. LITERATURA CITADA

- 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 freqüências de irrigação.** Botucatu: UNESP-FCA, 1997. 147p. Tese Doutorado.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua en el rendimiento de los cultivos.** Roma: FAO, 1979. 212p. (FAO.Riego y drenage, 33).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements.** Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO.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. (Eds.) **Irrigation scheduling: a guide for efficient on-farm water management.** Oakland: University of California of Agriculture, 1989. p.32-33.
- IRRIGAÇÃO. Joinville: Indústrias Schneider, [s.d] 96p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v.17, n.4, p.678-684, 1974.

- KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora, Ca: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133p.
- MOREIRA, H.J.C. **SAAC/ – Sistema agroclimatológico para o acompanhamento das culturas irrigadas** – manual prático para o manejo da irrigação. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993. 86p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188p.
- SOARES, J.M., COSTA, F.F. Irrigação na cultura da videira. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.19, n.194, p.58-59, 1998.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Trad. H.R. Gheyi, F.A.V., Damasceno, L.G.A Silva Jr., J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1997. 184p. (FAO. Irrigação e Drenagem, 36).

**Ministério  
da Agricultura  
e do Abastecimento**



**Embrapa**

---

*Embrapa Milho e Sorgo  
Rodovia MG 424 Km 45  
Caixa Postal 151 CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG  
Fone: 0xx31 779 1000 Fax: 0xx31 779 1088  
[www.cnpms.embrapa.br](http://www.cnpms.embrapa.br)*