

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTURA PARA O TRIGO (*Triticum aestivum L.*) IRRIGADO^{1/}

Paulo Miranda Pereira^{2/}
Gilberto C. Sedyama^{2/}
Hélio Alves Vieira^{2/}
Antonio Américo Cardoso^{3/}

1. INTRODUÇÃO

Na maioria dos projetos de irrigação, a captação e a elevação de água são os fatores relevantes, principalmente em razão do alto custo de energia, que encarece o insumo água na produção agrícola. Torna-se, portanto, uma necessidade a utilização de água de forma otimizada, especialmente em casos de limitada disponibilidade de água na área irrigada.

O manejo da irrigação requer determinação acurada da evapotranspiração. Quanto melhor for o conhecimento do valor da evapotranspiração, melhor será a quantificação da água a ser aplicada (2).

Para estimar a evapotranspiração real, recomenda-se, primeiro, estimar a evapotranspiração potencial, com base em dados meteorológicos ou de tanques de evaporação, e, em seguida, considerar os fatores que limitam as condições potenciais (4, 5). Um dos conceitos mais conhecidos de evapotranspiração potencial é a evaporação e transpiração verificadas num extenso terreno com vegetação verde, baixa, em pleno desenvolvimento, sombreando inteiramente o solo, com altura uniforme e sem deficiência de umidade (3).

A razão entre a evapotranspiração de uma cultura e a evapotranspiração potencial de uma cultura de referência denomina-se coeficiente de cultura. O conhecimento dos valores dos coeficientes de cultura é essencial a projetos de irrigação,

^{1/} Parte da tese apresentada, pelo primeiro autor, à Universidade Federal de Viçosa, para obtenção do título de «Magister Scientiae».

Recebido para publicação em 11-3-1985.

^{2/} Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. 36570 Viçosa, MG.

^{3/} Departamento de Fitotecnia da UFV. 36570 Viçosa, MG.

pois permite determinar quanto e quando irrigar, mediante o uso de dados climáticos, parâmetros físicos do solo e condições de manejo da cultura, facilmente disponíveis no campo (6).

Tendo como base o exposto, desenvolveu-se este trabalho, para as condições de Viçosa-MG, com os seguintes objetivos gerais:

a) estabelecer uma curva de coeficiente de cultura (K_c) da evapotranspiração do trigo irrigado, para todo o ciclo da planta, e b) estabelecer, ainda, o nível ótimo de lámina de água, com base na produtividade e outras características da cultura do trigo irrigado, como peso por hectolitro, altura da planta e número de perfilhos úteis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Procedimento Experimental

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (16 parcelas experimentais), com oito tratamentos e duas repetições.

Para a quantificação das láminas aplicadas foram usados os dados de lámina d'água evaporada no tanque Classe A (EV) na semana anterior, uma vez que o turno de rega foi de sete dias.

Foram usados os seguintes tratamentos:

Tratamento	Lâmina aplicada
1	0,6 x EV
2	0,7 x EV
3	0,8 x EV
4	0,9 x EV
5	1,0 x EV
6	1,1 x EV
7	1,2 x EV
8	1,3 x EV

2.2. Medição da Evapotranspiração Real

Foram usados 16 lisímetros Thorntwaite modificados, cada tanque com $3,0 \times 2,0 \times 1,5 \text{ m}^3$, sendo de 1,2 m a profundidade efetiva dos lisímetros, pois o 0,3 m restante foi preenchido com material envelope.

O enchimento dos tanques foi feito, seis meses antes do plantio, com amostra de solo do local classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico Distrófico, fase terraço. Para a camada superior, de 0,30 m, foi usada porção de solo extraída dessa mesma camada do solo original. A essa camada foi adicionado adubo orgânico (cama-de-galinha de palha de arroz).

No dia 30 de maio de 1983 foi plantado o trigo (*Triticum aestivum* L.), variedade Alondra 4546, mediante semeadura manual, em fileiras espaçadas de 0,19 m. Como o poder germinativo era de 50%, colocaram-se 160 sementes por metro linear, com o objetivo de obter um «stand» de 80 plântulas.

A evapotranspiração real da cultura foi obtida por meio da equação 1, que descreve o balanço hídrico do volume de controle em questão:

$$\Delta u = (P + I) - (ET + d + \Delta A), \quad \text{eq. 1}$$

em que

P = precipitação pluviométrica (mm);

I = irrigação aplicada (mm);

d = drenagem ou percolação (mm);

ΔA = variação no teor de umidade das plantas (mm);

Δu = variação no teor de umidade do solo do lisímetro (mm);

ET = evapotranspiração (mm).

Os componentes horizontais do fluxo de água do balanço podem ser desprezados, em razão da interferência das paredes do lisímetro. Ainda, como ΔA é desprezível, em relação aos demais componentes, a equação 1 reduz-se a

$$ET = P + I - d - \Delta u \quad \text{eq. 2}$$

Para avaliar a variação do teor de umidade do solo, foram instalados tensiômetros e células de Colman nos lisímetros, do seguinte modo: 14 parcelas com células de Colman instaladas a 0,30 m de profundidade; em uma das parcelas restantes foram instalados dois tensiômetros, um a 0,75 m de profundidade e outro a 0,95 m; na outra parcela foram instalados: uma célula de Colman, logo abaixo da superfície, e três tensiômetros, a 0,30, 0,60 e 0,90 m de profundidade. Com os valores do teor de umidade da última parcela citada, foi possível estimar a quantidade de água contida no solo, que, quando associada ao teor de umidade a 0,30 m e ao número de dias após a irrigação, permitiu estimar a quantidade de água das outras parcelas, por intermédio da seguinte equação:

$$\Theta_v = AR^b \quad \text{eq. 3}$$

em que

Θ_v = teor de umidade do solo;

A, b = constantes da regressão;

R = resistência, no caso das células, e potencial matricial, para os tensiômetros.

A quantidade de água (u) do solo foi estimada pela equação:

$$u = A\Theta_v^b D^c \quad \text{eq. 4}$$

A, b, c = constantes da regressão;

D = número de dias após chuva ou irrigação.

2.3. Avaliação da Evapotranspiração Potencial

Próximo da bateria de lisímetros, foi instalada uma estação agrometeorológica, sobre a superfície, gramada (*Paspalum notatum* L.) e irrigada freqüentemente, para manter a vegetação sempre em crescimento ativo após as podas periódicas.

Desenvolveu-se um programa de computador para o cálculo da evapotranspi-

ração potencial, pelos métodos de Penman, Blaney-Criddle e tanque Classe A.

Para o método de Penman foi usada a equação

$$ET_{PP} = (0,017 R_n \Delta/\gamma + E_{at})/(\Delta/\gamma + 1) \quad \text{eq. 5}$$

em que

- ET_{PP} = evapotranspiração potencial (mm.dia^{-1});
 R_n = fluxo de radiação líquida ($\text{cal.cm.}^{-2}\text{dia}^{-1}$);
 Δ = tangente à curva da pressão de vapor à temperatura média do ar;
 γ = constante psicrométrica ($0,5 \text{ mmHg.}^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 E_{at} = componente aerodinâmico (mm.dia^{-1}).

Para o método de Blaney-Criddle foi usada a expressão

$$ET_{pBC} = c[P(0,46 T_X + 8)] \quad \text{eq. 6}$$

em que

- ET_{pBC} = evapotranspiração potencial (mm.dia^{-1});
 T_X = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);
 P = percentual médio diário do total anual de horas possíveis de brilho solar;
 c = fator de ajuste.

Os valores de c usados foram os fornecidos por DOORENBOS e PRUITT (1), dependentes da umidade relativa mínima do dia, da velocidade média do vento durante o dia e das horas de brilho solar.

Para o método do tanque Classe A foi empregada a equação 7:

$$ET_{pCA} = K_p E_0 \quad \text{eq. 7}$$

sendo

- ET_{pCA} = evapotranspiração potencial (mm.dia^{-1});
 E_0 = evaporação medida no tanque Classe A (mm.dia^{-1});
 K_p = coeficiente do tanque.

Os valores de K_p usados foram os da tabela apresentada por DOORENBOS e PRUITT (1).

Os coeficientes de cultura foram obtidos das razões entre a evapotranspiração medida (ET_p) e as potenciais, estimadas pelas fórmulas de Penman (ET_{PP}) e de Blaney-Criddle (ET_{pBC}) e pelo método do tanque Classe A (ET_{pCA}). Esses coeficientes de cultura (K_c) foram submetidos a uma análise de regressão, tendo sido proposto o seguinte modelo

$$K_c = \exp (A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + \dots + A_n X^n) \quad \text{eq. 8}$$

sendo

- $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ = coeficientes da regressão;
 X = idade da planta (dias).

Foram calculados os coeficientes médios de cultura para cada estádio da planta, conforme a classificação de DOORENBOS e PRUITT (1).

2.4. Características Agronómicas do Trigo

A altura da planta foi definida quando a planta estava completamente desenvolvida, tendo sido tomada a medida do comprimento da planta desde a superfície do solo até a inserção da panícula. Foram tomadas medidas de quatro amostras de $0,19 \times 0,30 \text{ m}^2$ em cada parcela, distribuídas aleatoriamente dentro das parcelas.

A produtividade média de grãos foi tomada numa parcela de $1,9 \text{ m}^2$, inserta num lisímetro de $2,0 \times 3,0 \text{ m}^2$ de área útil. A umidade dos grãos foi medida pelo método da estufa e a produtividade foi corrigida para 13% de umidade (base seca).

O número de perfis úteis por área foi obtido por meio da contagem das panículas de cada parcela.

Para medir o peso por hectolitro, foi determinado o peso do volume de grãos de trigo amostrado em cada parcela. O volume escolhido foi o referente à menor parcela, em termos volumétricos. O peso por hectolitro foi corrigido para 13% de umidade (base seca).

Determinou-se, também, o índice de área foliar, por intermédio de medições diretas de amostras retiradas da bordadura, a cada 15 dias. Os valores do índice de área foliar (IAF) foram submetidos à análise de regressão, tendo sido proposto um modelo similar à equação 8.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados Biométricos

Dos parâmetros analisados, os tratamentos foram significativos, pelo teste F, a 5%, apenas para a produtividade. Os resultados do teste de Duncan, a 5% de probabilidade, são apresentados no Quadro 1. Conforme os dados desse Quadro, a maior produtividade foi a do tratamento $0,8 \times \text{EV}$ (1971 kg ha^{-1}), cuja média não diferiu, estatisticamente, pelo teste e nível escolhidos, das médias dos tratamentos $0,6$ e $0,7 \times \text{EV}$. O tratamento $1,2 \times \text{EV}$, de menor produtividade média, não diferiu estatisticamente dos tratamentos $1,0 \times \text{EV}$, $1,1 \times \text{EV}$ e $1,3 \times \text{EV}$, pelo mesmo teste e nível empregados.

O Quadro 2 apresenta a análise de correlação entre os parâmetros biométricos estudados. O peso por hectolitro e a produtividade foram as características de maior correlação. Dessa forma, a produtividade, em termos volumétricos, apresentou-se uniforme.

O modelo testado, para descrever o índice de área foliar (IAF), em termos de idade da planta, apresentou o seguinte resultado:

$$\text{IAF} = \exp(-6,98 + 0,69X - 0,0202X^2 + 0,00029X^3 - 0,21 \times 10^{-5}X^4 + 0,57 \times 10^{-8}X^5)$$

com um coeficiente de determinação de 0,99. Por causa do alto vigor vegetativo, a cultura apresentou um índice de área foliar máximo de 13,9 no sexagésimo sétimo dia.

QUADRO 1 - Teste de média dos resultados biométricos: produtividade, altura da planta, peso por hectolitro e per filhos úteis por metro quadrado^{1/}

Tratamento	Produção (kg.ha ⁻¹)	Altura da planta (m)	Peso por hectolitro (kg)	Perfilhos úteis (espigas.m ⁻²)
0,6 x EV	1605 ab	0,844 a	63 a	214 a
0,7 x EV	1541 ab	0,819 a	64 a	197 a
0,8 x EV	1971 a	0,842 a	68 a	233 a
0,9 x EV	1893 a	0,853 a	63 a	241 a
1,0 x EV	1083 bc	0,875 a	61 a	183 a
1,1 x EV	1248 bc	0,869 a	61 a	222 a
1,2 x EV	817 c	0,855 a	59 a	190 a
1,3 x EV	1221 bc	0,882 a	60 a	197 a

1/ As médias seguidas da mesma letra, em cada coluna, não diferem estatisticamente, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

3.2. Umidade do Solo

Para os valores de umidade do solo referentes às profundidades de 0,60 m e 0,90 m, utilizou-se a equação 3, na seguinte forma:

$$\Theta_V = 0,46H^{-0,048},$$

sendo H o módulo do potencial matricial do solo. Para o tensiômetro instalado a 0,30 m da superfície (camada com adubo orgânico), utilizou-se também a equação 3 (Figura 1):

$$\Theta_V = 20,77H^{-0,88}.$$

Para as células de Colman, a equação 3 (Figura 2) apresentou os seguintes resultados:

$$\Theta_V = 0,46 R^{-0,15},$$

sendo R a resistência das células (KOhm).

A lâmina de água contida no solo foi estimada do seguinte modo (Figura 3):

$$u = 0,71 \Theta_V^{0,41}/D^{0,061}$$

QUADRO 2 - Análise de correlação de Pearson

	Lâmina	Produtivi- dade	Perfilhos úteis	Altura	Peso por hectolitro
Lâmina	1,000	-	-	-	-
Produtividade	- 0,618 s	1,000	-	-	-
Perfilhos úteis	- 0,201 ns	0,229 ns	1,000	-	-
Altura	0,614 s	- 0,417 ns	- 0,258 ns	1,000	-
Peso por hectolitro	- 0,540 s	0,715 s	0,047 ns	- 0,397	1,000

Nota: Os coeficientes de correlação seguidos da letra s são significativos, pelo teste de Student (t), a 5%, e os seguidos de ns não são significativos, pelo mesmo teste e ao mesmo nível de significância.

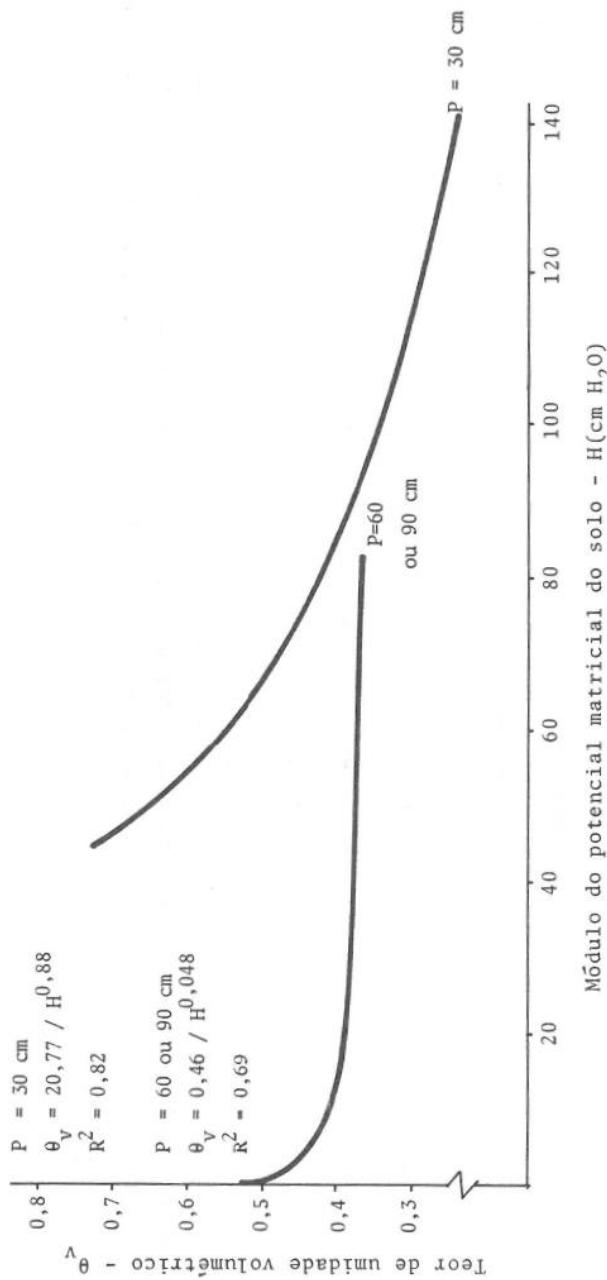


FIGURA 1 - Curvas do teor de umidade volumétrico do solo e potencial matricial do solo, em cm de coluna da água, medido com tensiômetro e mercúrio. As curvas referem-se ao solo com a adição de matéria orgânica ($P = 30 \text{ cm}$) e sem a adição de matéria orgânica ($P = 60 \text{ ou } 90 \text{ cm}$).

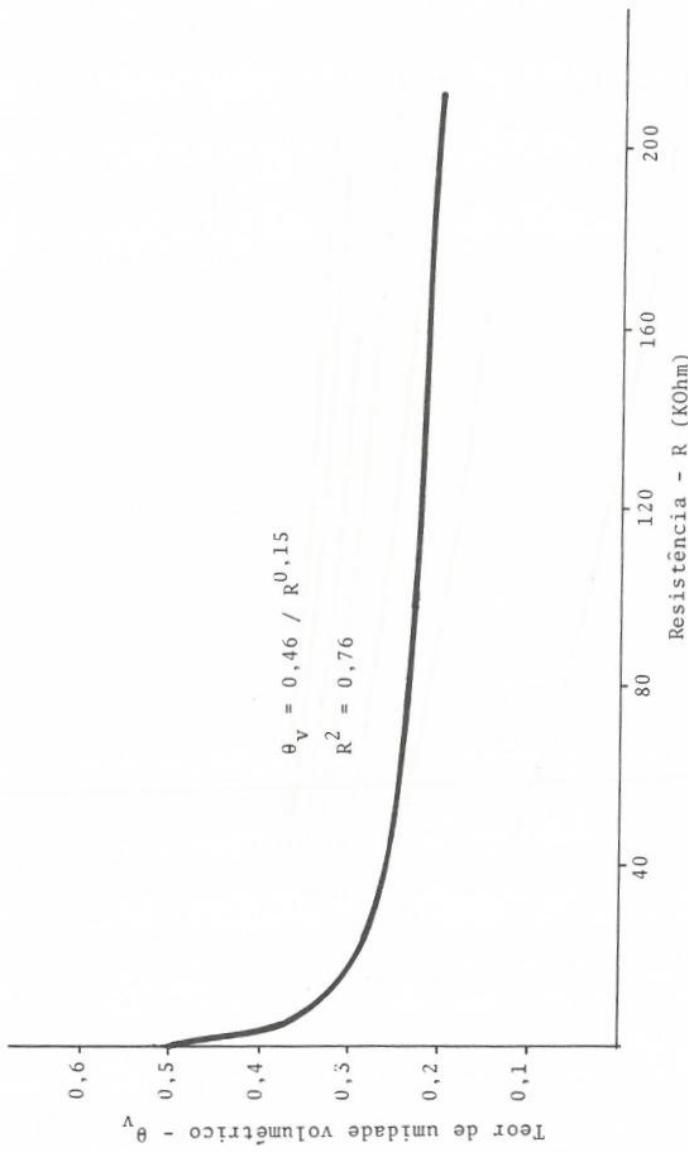


FIGURA 2 - Curva do teor de umidade volumétrico do solo e resistência medida nas células de Colman, em KOhm.

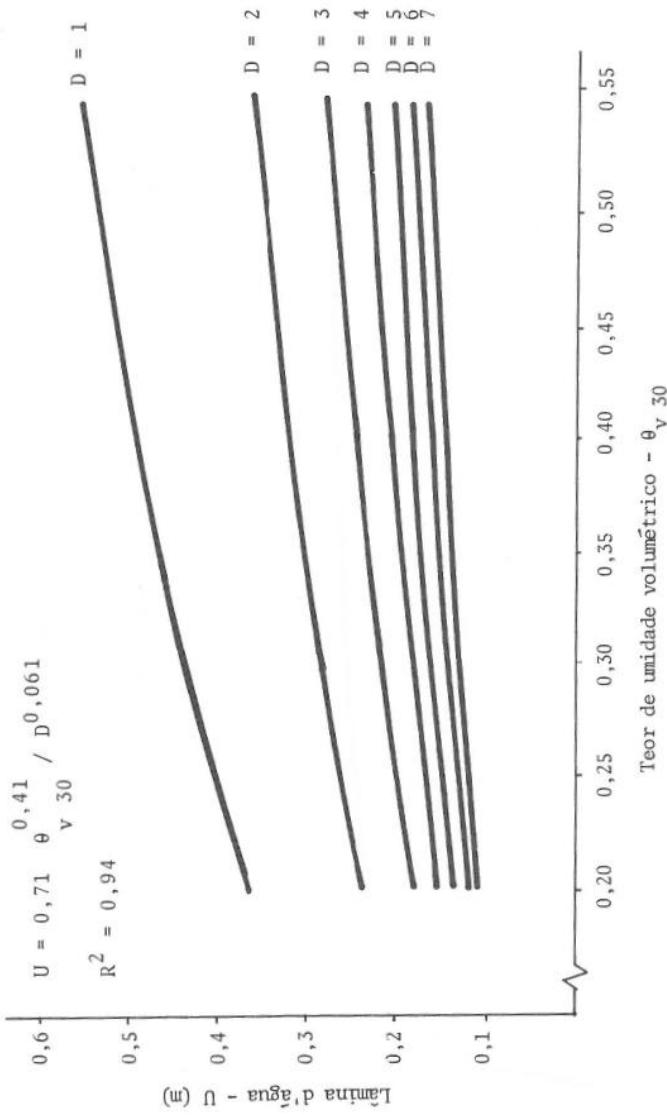


FIGURA 3 - Curvas da lâmina de água (U), em metros, contida num lisímetro e teor de umidade volumétrico, medido a 0,30 m de profundidade, para diferentes dias depois da irrigação ou de chuva (D). D varia de um a sete dias, uma vez que o turno de rega foi de sete dias.

Os traçados da Figura 3 referem-se ao período de um até sete dias após as irrigações, uma vez que o turno de rega foi de sete dias.

3.3. Coeficiente Médio da Cultura

Calculadas as quantidades de água no solo durante o ciclo da planta, para cada lisímetro, foi escolhido o de melhor fechamento do balanço, que foi o lisímetro cujo tratamento foi $1,2 \times EV$. Esse lisímetro apresentou boa distribuição de lâmina d'água percolada durante o ciclo vegetativo do trigo.

A Figura 4 representa os gráficos de evapotranspiração real versus evapotranspiração potencial acumulada e calculada com o emprego dos três métodos propostos:

— Para a fórmula de Penman:

$$ET_{ra} = 1,06 ET_P Pa.$$

O coeficiente de determinação foi igual a 0,98 e o coeficiente médio da cultura foi 1,06.

— Para a fórmula de Blaney-Criddle:

$$ET_{ra} = 0,88 ET_P BCa.$$

O coeficiente de determinação foi 0,97 e o valor do coeficiente médio de cultura foi 0,88.

— Para o método do tanque Classe A:

$$ET_{ra} = 1,28 ET_P CAa.$$

O coeficiente de determinação foi 0,98 e o coeficiente médio da cultura foi 1,28.

3.4. Coeficiente Médio por Estádio

Os períodos, em dias, para cada estádio, foram de 15, 20, 74 e 24 dias.

Os coeficientes médios de cultura, por estádio, foram, respectivamente:

— Penman: 0,51; 1,18; 1,14 e 0,46.

— Blaney-Criddle: 0,41; 0,96; 0,98 e 0,34.

— Classe A: 0,63; 1,56; 1,34 e 0,57.

As Figuras 5, 6 e 7 representam os gráficos referentes aos modelos propostos para descrever os coeficientes de cultura obtidos pelas fórmulas de Penman e de Blaney-Criddle e pelo método do tanque Classe A, respectivamente.

Para a fórmula de Penman:

$$K_{CP} = \exp(-1,43 + 0,085D - 0,0012D^2 + 4,48 \times 10^{-6}D^3).$$

Para a fórmula de Blaney-Criddle:

$$K_{CB} = \exp(-1,72 + 0,091D - 0,013D^2 + 4,69 \times 10^{-6}D^3).$$

Para o método do tanque Classe A:

$$K_{CC} = \exp(-1,15 + 0,084D - 0,0012D^2 + 4,88 \times 10^{-6}D^3).$$

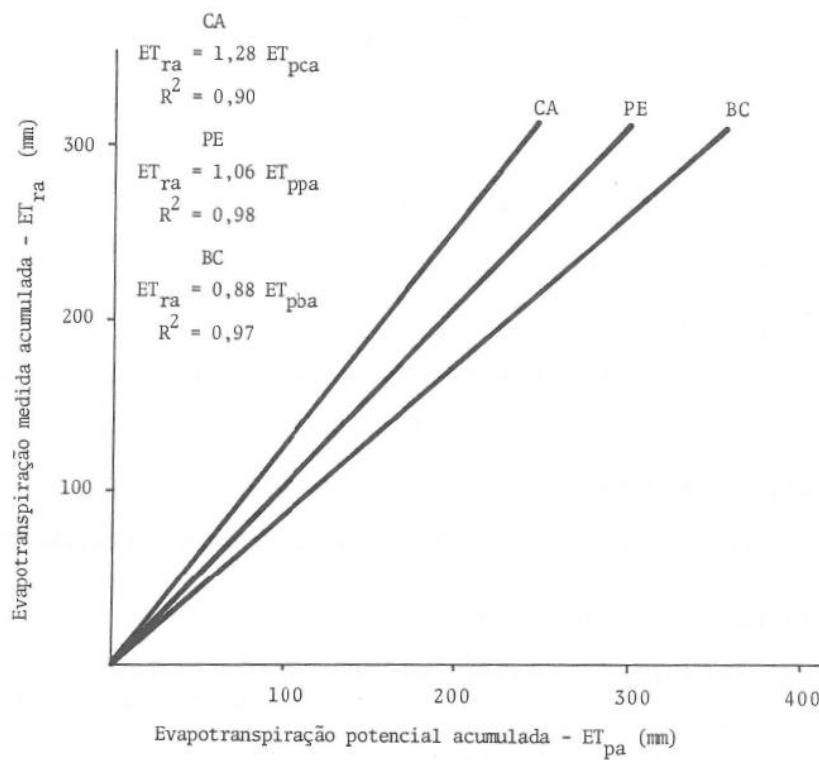


FIGURA 4 - Curvas de evapotranspiração medida acumulada, em mm, e evapotranspiração potencial acumulada (ET_{pa}), em mm, estimadas pelas equações de Blaney-Criaddle (BC) e de Penman (PE) e pelo tanque Classe A (CA).

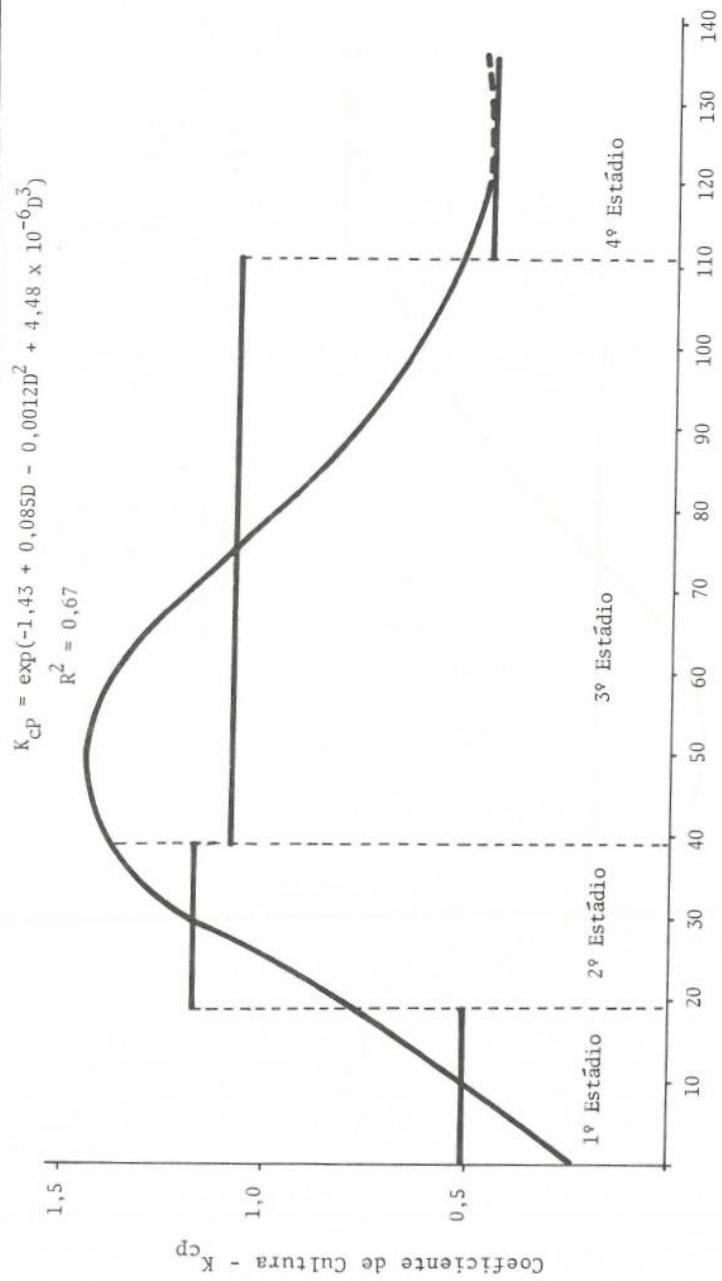


FIGURA 5 - Valores médios dos coeficientes de cultura, por estádio da planta, curva do coeficiente de cultura (evapotranspiração medida sobre evapotranspiração potencial, calculada pela fórmula de Penman) e idade da planta.

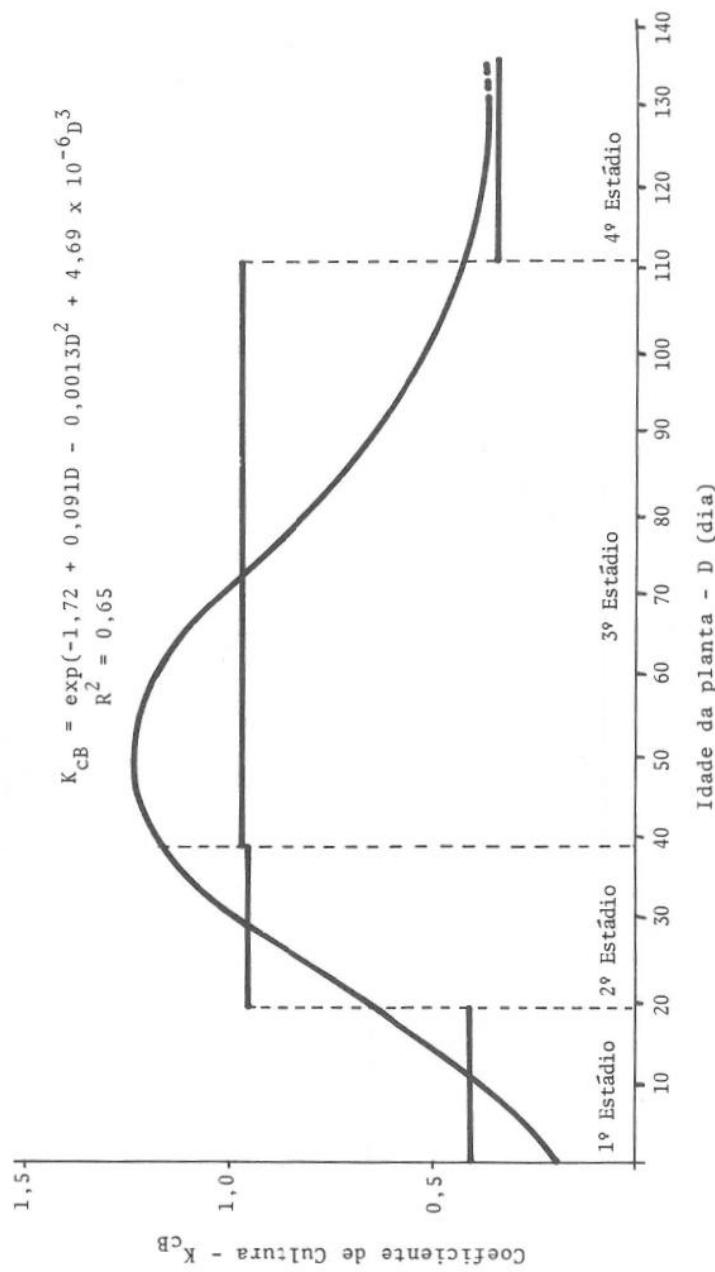


FIGURA 6 - Valores médios dos coeficientes de cultura, por estádio da planta, curva do coeficiente de cultura (evapotranspiração medida sobre evapotranspiração potencial, calculada pela fórmula de Blaney-Criddle) e idade da planta.

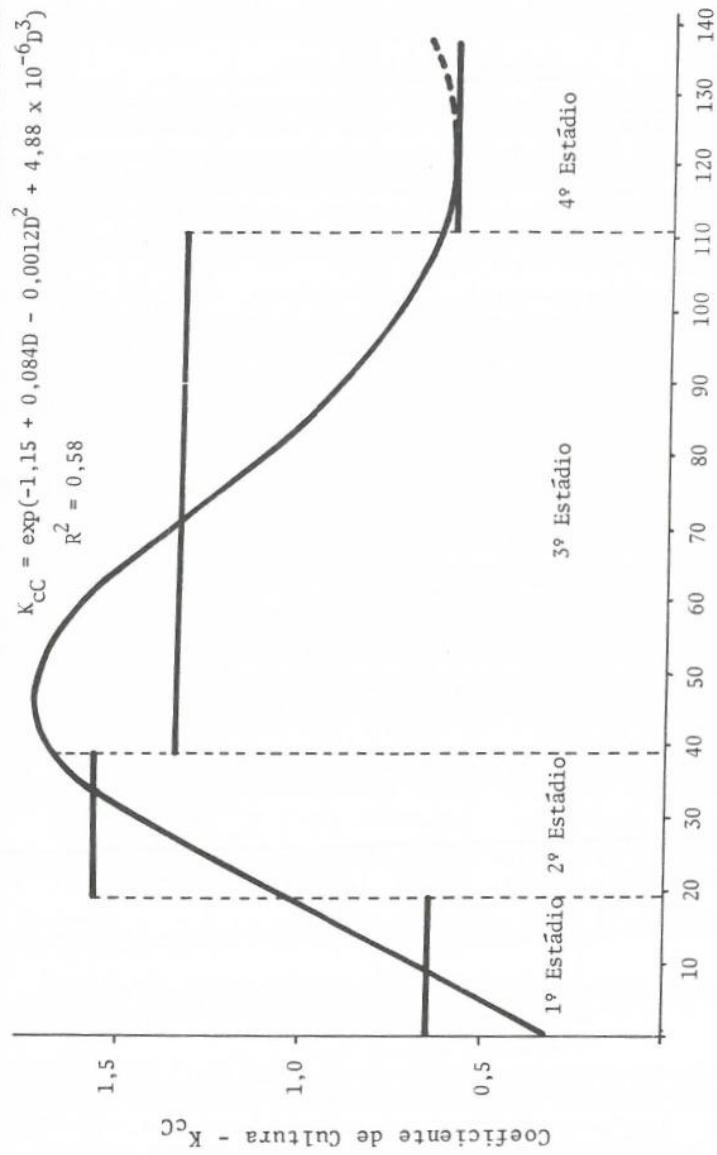


FIGURA 7 - Valores médios dos coeficientes de cultura, por estádio da planta, curva do coeficiente de cultura (evapotranspiração medida sobre evapotranspiração potencial, estimada pelo método do tanque Classe A) e idade da planta.

Do ponto de K_c máximo até em torno de centésimo trigésimo dia, todas as três curvas decresceram. A partir daí, começaram a crescer, apesar do decrescimento vegetativo. Nesse período houve ocorrência de chuvas intensas, seguidas de um intervalo de estiagem e alta demanda evaporativa. Quando o vegetal praticamente não transpira, a evaporação é o principal regulador da evapotranspiração. Tal fato propiciou uma elevação da evapotranspiração real, fazendo com que subissem novamente as curvas no final do ciclo vegetativo da planta.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Foi medida a evapotranspiração real do trigo irrigado, para as condições edafoclimáticas de Viçosa, MG, por intermédio de 16 lisímetros de percolação. Foram medidos, ainda, parâmetros necessários às equações de Penman e de Blaney-Criddle e à evaporação no tanque Classe A, bem como algumas características do trigo, como produtividade, peso por hectolitro, altura da planta, IAF e perfis úteis.

Com a evapotranspiração real e as evapotranspirações potenciais, calculadas pelas fórmulas de Penman e Blaney-Criddle e pelo método do tanque Classe A, foram calculados os coeficientes culturais.

Os parâmetros biométricos, com exceção do IAF, foram submetidos à análise de variância e, posteriormente, ao teste de médias. O IAF e os coeficientes culturais foram submetidos à análise de regressão.

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1 — a evapotranspiração real média do trigo, para as condições de Viçosa, MG, no inverno, foi de $2,6 \text{ mm.dia}^{-1}$;

2 — os coeficientes médios da cultura do trigo irrigado foram de 0,88 para evapotranspiração potencial (ETP) estimada por Blaney-Criddle, de 1,06 para o método de Penman e de 1,28 para o tanque Classe A;

3 — quando se estabelece a irrigação do trigo apenas com dados de tanque de Classe A, o coeficiente usado para a redução de E_v a ET_r deve estar entre 0,6 e 0,8;

4 — os coeficientes de cultura, K_c , podem ser estimados com base na idade da planta, por intermédio das seguintes equações:

$$K_{cP} = \exp(-1,43 + 0,085D - 0,0012D^2 + 4,48 \times 10^{-6}D^3), R^2 = 0,67;$$

$$K_{cB} = \exp(-1,72 + 0,091D - 0,0013D^2 + 4,69 \times 10^{-6}D^3), R^2 = 0,65;$$

$$K_{cC} = \exp(-1,15 + 0,084D - 0,0012D^2 + 4,88 \times 10^{-6}D^3), R^2 = 0,58$$

5. SUMMARY

(DETERMINATION OF THE CROP COEFFICIENT FOR IRRIGATED WHEAT (*Triticum aestivum* (L.))

Actual evapotranspiration measurements of irrigated wheat, grown under the soil and climatic conditions of Viçosa, MG., were taken by means of 16 drainage-type lysimeters, and the crop evapotranspiration coefficient (K_c) determined in relationship to the potential evapotranspiration as obtained with USWB Class A evaporation pan, Penman and Blaney-Criddle equations.

The wheat crop characteristics were studied by means of analyses of variance. The leaf area index and the crop evapotranspiration coefficients were submitted to regression analyses.

The results suggest that when the actual evapotranspiration and potential evapotranspiration relationships are used, the average crops coefficients can be: 0.88 for Blaney-Criddle equation; 1.06 for Penman equation; and, 1.28 for USWB Class A pan method.

The average wheat crop actual evapotranspiration for Viçosa winter conditions was 2.6 mm.day⁻¹.

6. LITERATURA CITADA

1. DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Roma, F.A.O., 1977. 144 p. (Technical Note 24).
2. JENSEN, M.E.; WRIGHT, I.L. & PRATT, B.I. Estimation of soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of the ASAE*, 69:954-959. 1971.
3. PHYSICS IN AGRICULTURE PROC. INF. MEETING ON 1956. Conclusions reached after discussion concerning evaporation. *Northland Journal of the Agricultural Science*, 95-97, 1956. Apud: CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Bragantia*, 21:163-213. 1962.
4. PRUITT, W.O. Relation of consumptive use of water to climate. *Transactions of the ASAE*, 3:9-13. 1960.
5. SAXTON, K.E.; JOHNSON, H.P. & SHAW, R.H. Watershed evapotranspiration estimated by combination method. *Transactions of the ASAE*, 17:668-672. 1974.
6. WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108:57-74. 1982.