

O MODELO DE RITCHIE NA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) IRRIGADO¹

Lineu Neiva Rodrigues²
Everardo Chartuni Mantovani³
Márcio Mota Ramos³
Gilberto Chohaku Sedyama³

1. INTRODUÇÃO

A água, na maior parte do Brasil, é um recurso relativamente farto, mesmo assim sua utilização deve ser otimizada para atender às diversas demandas, que muitas vezes são conflitantes.

Até recentemente não existia grande preocupação em racionalizar o seu uso em projetos de irrigação. Todavia, o aumento da demanda, aliado à pequena disponibilidade de água em algumas regiões, vem acentuando a necessidade de manejá-la eficientemente.

Dentre os diversos métodos de manejo da irrigação, têm-se destacado, pela sua operacionalidade, aqueles que estimam o consumo de água pelas culturas, ou seja, a evapotranspiração (ET) ou uso consuntivo. A maioria deles estima a evapotranspiração potencial, isto é, a evapotranspiração que ocorre quando não há deficiência de água no solo que limite seu uso pelas plantas.

Dentre esses vários métodos utilizados para cálculo da ET, o que alcançou maior popularidade foi o proposto por DOORENBOS e PRUITT (3), segundo o qual a ET é calculada pelo produto da evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o), por um coeficiente (k_c).

¹ Aceito para publicação em 28.08.1996.

² Estudante de Doutorado do Dep. de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa.

³ Dep. de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. 36571-000 Viçosa, MG.

A obtenção de valores confiáveis da evapotranspiração de uma cultura requer, além de uma estimativa adequada da ETo , coeficientes de cultura adequados. O k_c depende, sobretudo, do estágio de desenvolvimento da cultura, das condições climáticas e do conteúdo de água no perfil do solo (função principalmente das chuvas e da irrigação). A simplicidade desse método, responsável por seu êxito, acarreta, porém, inconvenientes associados à estimação do k_c .

Uma alternativa para solucionar o problema consiste em utilizar modelos que separam a evaporação direta do solo (E_s) e a transpiração das plantas (E_p) para estimar a ET , evitando-se, assim, os problemas associados à natureza empírica do método de DOORENBOS e PRUITT (3).

Uma das metodologias baseadas nesse princípio foi proposta por RITCHIE (8). Infelizmente essa metodologia ainda traz incertezas com relação à influência que certos parâmetros de entrada do modelo relacionados com o clima, com a planta e com o solo exercem sobre o resultado final, a ET .

Também, por causa de algumas considerações de ordem empírica feitas na elaboração do modelo, aconselha-se que, antes de seu uso em uma região diferente daquela em que ele foi desenvolvido, sejam feitas calibrações.

Com o presente trabalho, objetivou-se testar o modelo de Ritchie para as condições edafoclimáticas de Viçosa, MG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local

O experimento foi instalado no campus da Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa, MG, cujas coordenadas geográficas são: $20^{\circ}45'S$ de latitude, $42^{\circ}51'W$ de longitude e 651m de altitude.

A parcela experimental, cuja dimensão era de 720 m^2 (12 x 60), foi dividida em duas subparcelas com dimensões de 108 m^2 (9 x 12), sendo o restante da área considerada como bordadura.

Uma subparcela foi irrigada de cinco em cinco dias e a outra de dez em dez dias, alta e baixa frequência de irrigação, respectivamente.

Tal procedimento possibilitou analisar a influência da precipitação no k_c , bem como verificar a sensibilidade do modelo de Ritchie às variações de precipitação.

2.2. Solo

O solo da área é classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico, fase terraço, com camada superficial de textura franco-arenosa.

2.3. Cultura

O experimento foi conduzido no período de agosto a novembro de 1994, utilizando-se o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Carióquina, semeado manualmente com espaçamento entre fileiras e plantas de 0,50 m e 0,10 m, respectivamente, o que corresponde a uma população de aproximadamente 200.000 plantas por hectare.

A adubação foi feita de acordo com a quarta aproximação para o Estado de Minas Gerais (2).

2.4. Sistema de Irrigação

O experimento foi irrigado com um conjunto de irrigação por aspersão, composto de tubulação de aço zincado com engate rápido de três polegadas, aspersores setoriais com bocal de 6,0 mm pressão de serviço de 250 kPa, vazão de $2,10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e raio de alcance de 16,25 m, espaçados de 12 x 12 m. Obteve-se um coeficiente médio de uniformidade de Christianesen (CUC) nas duas subparcelas de 87 %.

2.5. Coleta dos Parâmetros Climáticos

Os elementos climáticos necessários à execução do modelo foram coletados às 9 h, em uma estação agrometeorológica instalada próximo às subparcelas.

2.6. Determinação da Evapotranspiração

Neste trabalho, a ET foi calculada pelo método do balanço de umidade do solo (1), pelo método do tanque classe A-FAO (3) e pelo modelo de Ritchie (8,5).

2.6.1. Método do Balanço de Umidade do Solo

Este método baseia-se na quantificação dos componentes do balanço de massa, isto é, irrigação, chuva, evapotranspiração, percolação e vari-

ação da umidade do solo, podendo ser representado pela equação

$$ET = I + P + \frac{[(U_i - U_f) Da h]}{100} - D \quad (1)$$

em que

I = irrigação no período, em mm;

P = precipitação pluvial, em mm;

U_i = porcentagem de umidade ponderada por camada de solo na primeira amostragem, em % peso;

U_f = porcentagem de umidade ponderada por camada de solo, na segunda amostragem, em % peso;

D_a = massa específica ponderada por camada de solo, em $g\ cm^{-3}$;

h = espessura da camada de solo avaliada, em mm; e

D = percolação, em mm.

Na Equação 1, desprezou-se o escoamento superficial em face das seguintes considerações : a) área de topografia plana e b) controle da lâmina aplicada.

A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico até a profundidade de 75cm, com o objetivo de verificar a existência de percolação, embora não se esperasse a ocorrência desta, uma vez que foi feito um controle da lâmina de irrigação.

2.6.2. Método do Tanque Classe A-FAO

Foi utilizada a equação recomendada por DOORENBOS e PRUITT (3), expressa por

$$ET_o = kt\ ECA \quad (2)$$

em que

kt = coeficiente do tanque, adimensional; e

ECA = evaporação medida no tanque classe A, $mm\ dia^{-1}$.

O valor de kt foi obtido em tabela apresentada por DOORENBOS e PRUITT (3), levando-se em consideração a área de cobertura vegetal na vizinhança do tanque e as condições de vento e umidade.

Para determinação da evapotranspiração da cultura do feijão, foi utilizada a seguinte equação:

$$ET = ET_o\ kc \quad (3)$$

Os valores dos coeficientes de cultura utilizados foram obtidos em tabela apresentada por DOORENBOS e PRUITT (3).

2.6.3. Modelo de Ritchie

O modelo baseia-se em trabalhos de RITCHIE (8) e JONES e RITCHIE (5) e consiste em estimar a evapotranspiração, calculando-se, de forma independente, a evaporação da água do solo (E_s) e a transpiração (E_p), conforme a equação

$$ET = E_s + E_p \quad (4)$$

Na Figura 1, apresenta-se o fluxograma simplificado utilizado no cálculo da ET.

No cálculo da E_s , o modelo considera as fases de evaporação da água da superfície do solo descritas por PHILIP (7) e comprovadas, posteriormente, por IDSO *et alii* (4), a saber:

Fase 1 - A superfície do solo está úmida. O componente E_s ocorre a uma taxa constante, sendo limitado apenas pelo suprimento de energia na superfície.

Fase 2 - A superfície do solo está seca e o componente E_s passa a depender de parâmetros físicos do solo.

Fase 3 - O solo está muito seco, não dando condições mínimas para o desenvolvimento da cultura. Esta fase não é considerada para fins de irrigação.

Para definição da duração da fase 1 de evaporação da água do solo, RITCHIE (8) estabeleceu o parâmetro U . O mesmo autor estabeleceu também o parâmetro α como a taxa com que a água evapora do solo na fase 2. Esses parâmetros (U e α) podem ser determinados, utilizando-se microlisímetros de pesagem, conforme descrito por RODRIGUES (9).

O cálculo da E_s para a fase 1 é feito por meio das Equações 5 e 6, que são funções da evapotranspiração máxima e dependentes do índice de área foliar:

$$E_{S_1} = ET_{MAX} [1 - 0,43 (IAF)] , \text{ se } IAF < 1 \quad (5)$$

$$E_{S_1} = \left(\frac{ET_{MAX}}{1,1} \right) e^{-0,4 IAF} , \text{ se } IAF \geq 1 \quad (6)$$

em que

E_{S_1} = evaporação da água do solo, na fase 1; e

ET_{MAX} = evapotranspiração máxima.

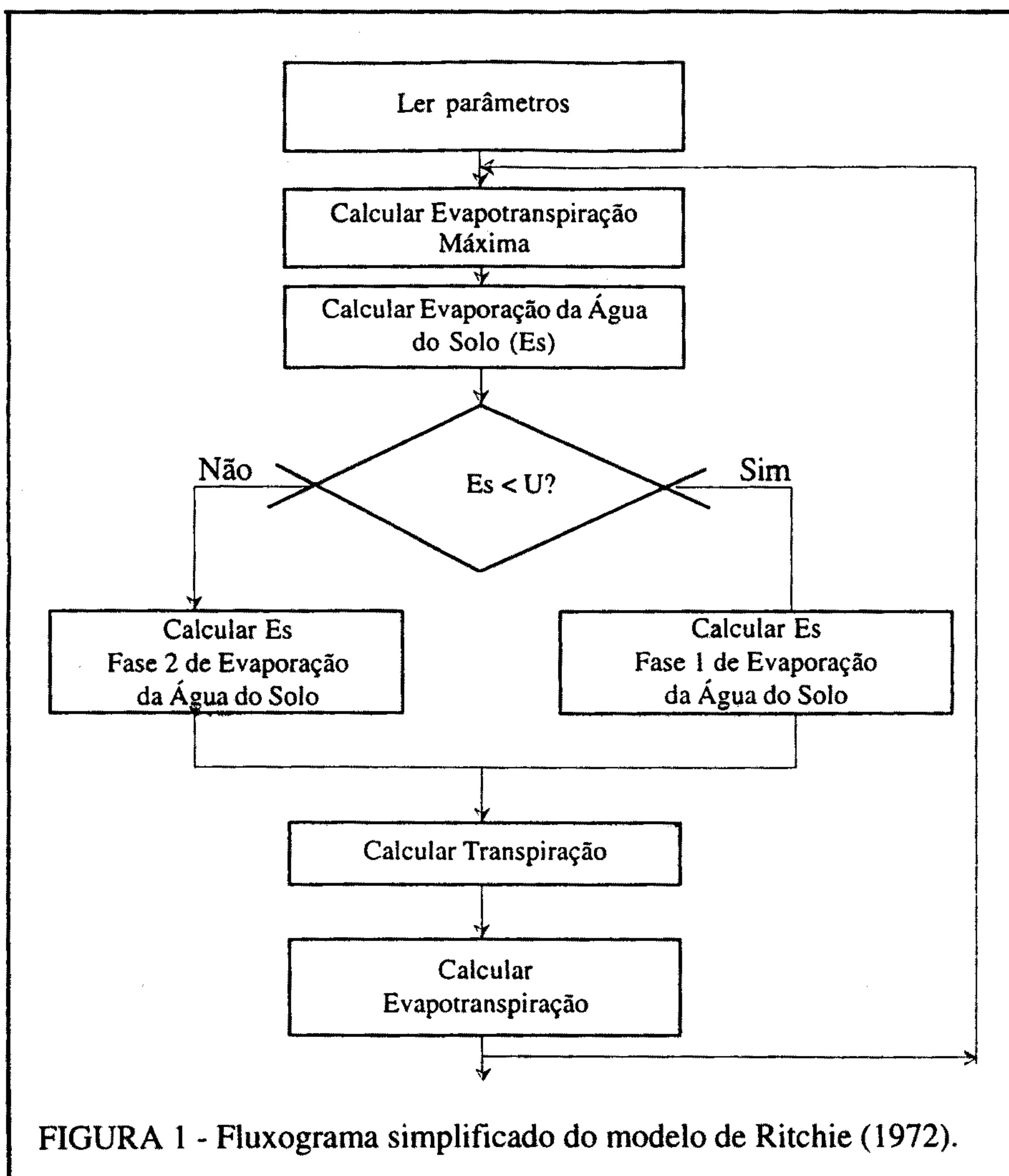


FIGURA 1 - Fluxograma simplificado do modelo de Ritchie (1972).

Para a fase 2, E_s depende do tempo transcorrido desde a troca de fase (função do parâmetro U do solo). Sendo assim, E_s foi calculada pela Equação 7, para valores individuais (E_{s_2} , mm dia^{-1}) ou pela Equação 8, para valores acumulados ($E_{s_{2a}}$, mm dia^{-1}).

$$E_{s_2} = \alpha t^{-1/2} \quad (7)$$

$$E_{s_{2a}} = \alpha t^{1/2} \quad (8)$$

em que

t = tempo transcorrido desde a troca de fase; e

α = parâmetro que caracteriza a segunda fase de evaporação.

A transpiração ou evaporação da água da planta é calculada em função da ET_{MAX} e do estágio de desenvolvimento do cultivo (IAF), utilizando-se as Equações 9 ou 10.

$$Ep = ET_{MAX} [1 - e^{-IAF}] , \text{ se } IAF \leq 3 \quad (9)$$

$$Ep = ET_{MAX} , \text{ se } IAF > 3 \quad (10)$$

Se $Es + Ep > ET_{MAX}$, o valor de Ep é recalculado pela Equação $Ep = ET_{MAX} - Es$.

Para o cálculo da ET_{MAX} , o método utiliza o conceito de evaporação de equilíbrio (EEQ) desenvolvido por Priestley e Taylor :

$$EEQ = Rs (4,88 \times 10^{-3} - 4,37 \times 10^{-3} \alpha_2) (t_d + 29) \quad (11)$$

em que

Rs = radiação solar, em $MJ m^{-2} d^{-1}$;

α_2 = albedo da superfície solo-cultura; e

t_d = temperatura média do fotoperíodo, em $^{\circ}C$.

A temperatura média do fotoperíodo é calculada em função das temperaturas máxima (T_{MAX}) e mínima (T_{MIN}):

$$T_d = 0,6 T_{MAX} + 0,4 T_{MIN} \quad (12)$$

O valor de α_2 foi determinado por meio da Equação 13, que relaciona o albedo do cultivo (α_c) com o albedo do solo (α_s) e o IAF:

$$\alpha_2 = \alpha_c - (\alpha_c - \alpha_s) e^{(-0,75 IAF)} \quad (13)$$

A ET_{MAX} , calculada pela Equação 14, é função do valor de EEQ, obtida pela Equação 11, e de uma correção α_1 , dependente do valor da temperatura. A Equação 15 visa compensar o efeito do ar não saturado; a Equação 16, o efeito da advecção; e a Equação 17, a influência das baixas temperaturas nos estômatos.

$$ET_{MAX} = \alpha EEQ \quad (14)$$

$$\alpha_1 = 1,1 \quad \text{se } 5 < T_{MAX} \leq 35^{\circ} C \quad (15)$$

$$\alpha_1 = [1,1 + 0,05 (T_{MAX} - 35)] \quad \text{se } T_{MAX} > 35^\circ C \quad (16)$$

$$\alpha_1 = 0,01 e^{[0,18 (T_{MAX} + 20)]} \quad \text{se } T_{MAX} \leq 5^\circ C \quad (17)$$

2.6.3.1. Determinação da Área Foliar

A área foliar da cultura foi determinada uma vez por semana até a cobertura completa do solo (final do desenvolvimento vegetativo). Recolhia-se todas as plantas em 0,5 metro linear, em três pontos representati-

O índice de área foliar (IAF) foi calculado pelo produto entre a área foliar por planta (A ; $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) e a densidade de plantio (PP ; planta m^{-2}), utilizando-se a seguinte equação

$$IAF = A \cdot PP / 10000 \quad (18)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimação da ET

Os valores simulados e medidos da ET para a cultura do feijoeiro, para as duas freqüências de irrigação, podem ser vistos na Figura 2. A ET das duas subparcelas variou desde valores menores que 1mm na fase inicial até 7mm na fase de cobertura completa.

Apesar de a comparação entre os valores medidos e simulados não poder ser precisa e completa em razão da diferença no tempo entre o valor medido (cinco ou dez dias) e o valor simulado (diário), observa-se uma coerência dos valores simulados, que aumentam com a área foliar e atingem seus valores máximos após uma chuva ou irrigação.

Para a subparcela de alta freqüência (2a), o modelo simulou, com muita precisão, os valores de ET medidos, principalmente durante as fases inicial e de crescimento rápido, como já havia sido comprovado por MANTOVANI (6).

A ET simulada da subparcela de baixa freqüência (2b) superestimou o valor da ET medida, comprovando que o modelo, segundo RITCHIE (8), não é adequado para ser usado em condições limitantes de água.

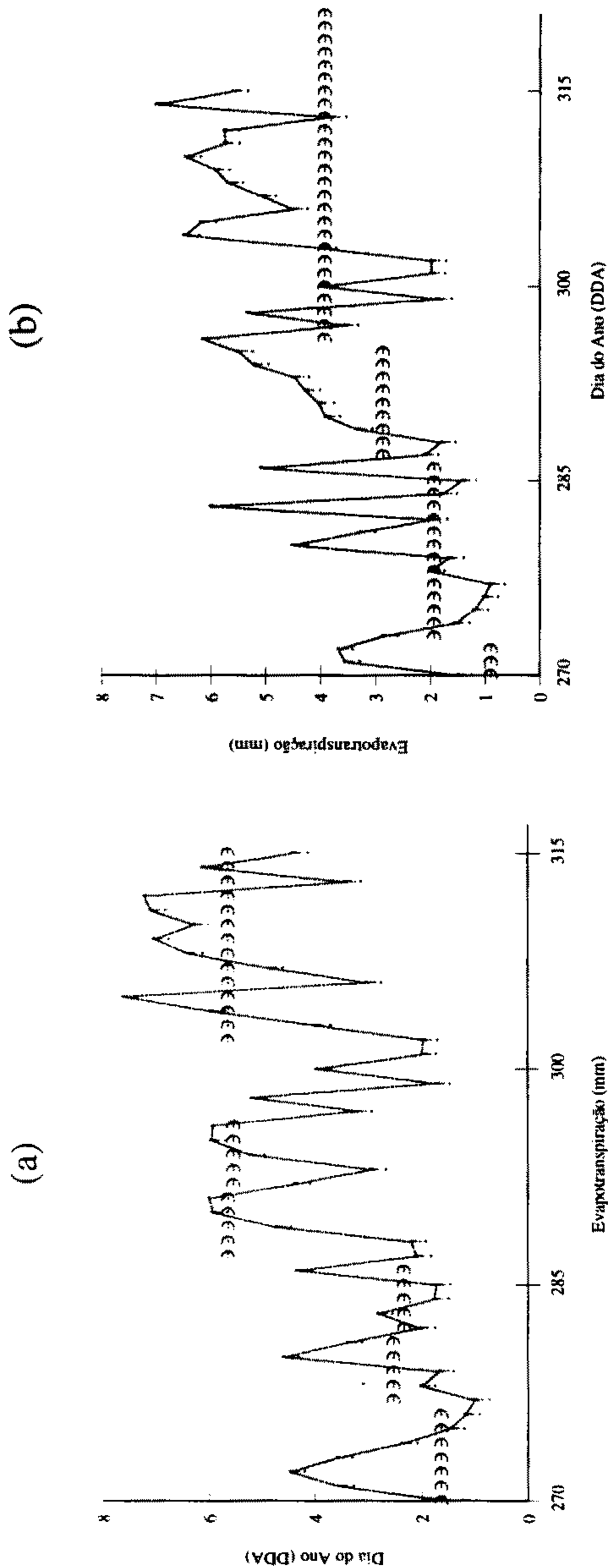


FIGURA 2 - Curva representativa da evolução da ET medida pelo método do balanço de umidade de no solo (ET BAL) e simulada pelo modelo de Ritchie, dados diários (ET RIT. DIÁRIO), em função do dia juliano, para a cultura do feijoeiro nas subparcelas de alta (a) e baixa (b) frequência de irrigação.

Na subparcela de alta frequência de irrigação, a E_s simulada representou 52% do total evapotranspirado; já para valores de $IAF \leq 1$, 58% e de $IAF \geq 2$, apenas 37% do total de água perdida. Observou-se, então, a forte influência do IAF no valor da ET , comprovando que, para altos valores de IAF , a componente que mais influencia no valor da ET é a E_p , sendo a E_s a principal componente para baixos valores de IAF .

Fazendo essa mesma análise para a subparcela de baixa frequência, observou-se que E_s representou 47% do total de água perdida, enquanto a E_p , 53%.

Esses resultados possibilitaram um estudo mais detalhado do modelo, explicando por que a E_s foi baixa e a E_p alta na subparcela de baixa frequência.

No decorrer do experimento predominou elevada demanda evaporativa no período considerado, o que favoreceu o alcance rápido do valor-limite (U), passando da fase 1 para a fase 2, em que as características físicas do solo passam a predominar. Esta mudança de fase implica a diminuição da E_s com o decorrer do tempo, pois a equação usada para o seu cálculo na fase 2 (Equação 7) possui como denominador a raiz quadrada do tempo, proporcionando, assim, valores de E_s menores na parcela de baixa frequência.

Por outro lado, a rotina do modelo usada para calcular a E_s na fase 2 afeta somente o seu resultado, não influenciando no procedimento usado para calcular a E_p , que para situações em que $IAF \leq 3$ (subparcela de baixa frequência) é dependente do IAF e da ET_{MAX} . Estes, por sua vez, dependem principalmente da demanda evaporativa da atmosfera, que, no período considerado, foi elevada, favorecendo a ocorrência de altos valores de E_p . Outro fator que contribuiu para a ocorrência de altos valores de E_p , na subparcela de baixa frequência, foi a cultura ter atingido rapidamente os valores máximos de IAF .

Na subparcela de baixa frequência, o valor da E_p poderia ter sido reduzido pela rotina do modelo, que limita o valor da ET ao da ET_{MAX} . Isso significa que se a soma da E_p com a E_s ultrapassar o valor da ET_{MAX} , o valor da E_p será corrigido. Porém, mesmo com esta restrição ao seu valor, já que a correção é feita, igualando-se a E_p ao resultado da subtração da ET_{MAX} pela E_s , e com o baixo valor de E_s , a E_p continua alta.

Para valores de $IAF \leq 1$, a E_s representou 64 % do total da água perdida e, para valores de $IAF \geq 2$ E_s , apenas 30 %. A primeira situação pode ser explicada por ocorrências de chuvas mais constantes, mantendo-se a evaporação da água do solo na fase 1 de evaporação, em que ela é maior, associada aos baixos valores de IAF que limitaram a E_p .

Na segunda situação notam-se altos valores de IAF , favorecendo a

Ep, aliada a baixas precipitações e altas temperaturas, desfavorecendo a Es.

3.2. *Estimação do kc*

Utilizando os valores de ET medidos e simulados para as duas frequências de irrigação (Figuras 2a e 2b) e considerando os valores de ETo estimados durante o experimento (tanque classe A - FAO), calculou-se o kc para as fases de desenvolvimento do cultivo até a cobertura completa do solo.

Nas Figuras 3a e 3b são mostrados os valores de kc simulados e medidos para as frequências de irrigação, alta e baixa.

Observa-se uma tendência de crescimento do kc com o aumento do IAF. Os picos na curva do kc ocorrem após uma chuva ou irrigação. Os valores de kc simulados ficaram entre 0,2 e 1,7 e os medidos, entre 0,3 e 1,2, para a subparcela irrigada com alta frequência; e, para subparcela irrigada com baixa frequência, os valores simulados variaram de 0,2 a 1,7 e os medidos de 0,3 a 0,9.

No Quadro 1 apresentam-se os valores de kc para a subparcela de alta frequência, para os estádios 1, 2 e 3, obtidos por três metodologias diferentes. A determinação de cada estágio da cultura foi feita mediante o conhecimento do IAF, que foi calculado semanalmente.

Observa-se um bom ajuste entre os valores medidos e simulados, coincidindo nos estádios 1 e 3 e com pequena subestimação no estágio 2. O valor de kc sugerido pelo método FAO subestimou-se em relação aos das outras duas metodologias usadas, com maior discrepância no estágio 2.

No Quadro 2, encontram-se os mesmos valores do quadro anterior, agora para a subparcela de baixa frequência. Neste caso, observam-se melhores estimativas do kc estimado pelo método FAO, com pequena subestimação nos estádios 1 e 2 e superestimação no estágio 3, enquanto o método de Ritchie superestimou o valor de kc em relação aos demais em todos os estádios (1, 2 e 3).

Isso pode ser explicado pela consideração feita por RITCHIE (9) a respeito da não-adequação do modelo para condições de déficit hídrico, cuja ocorrência foi analisada anteriormente nessa subparcela.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi realizado no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. O experimento constou de duas subparce-

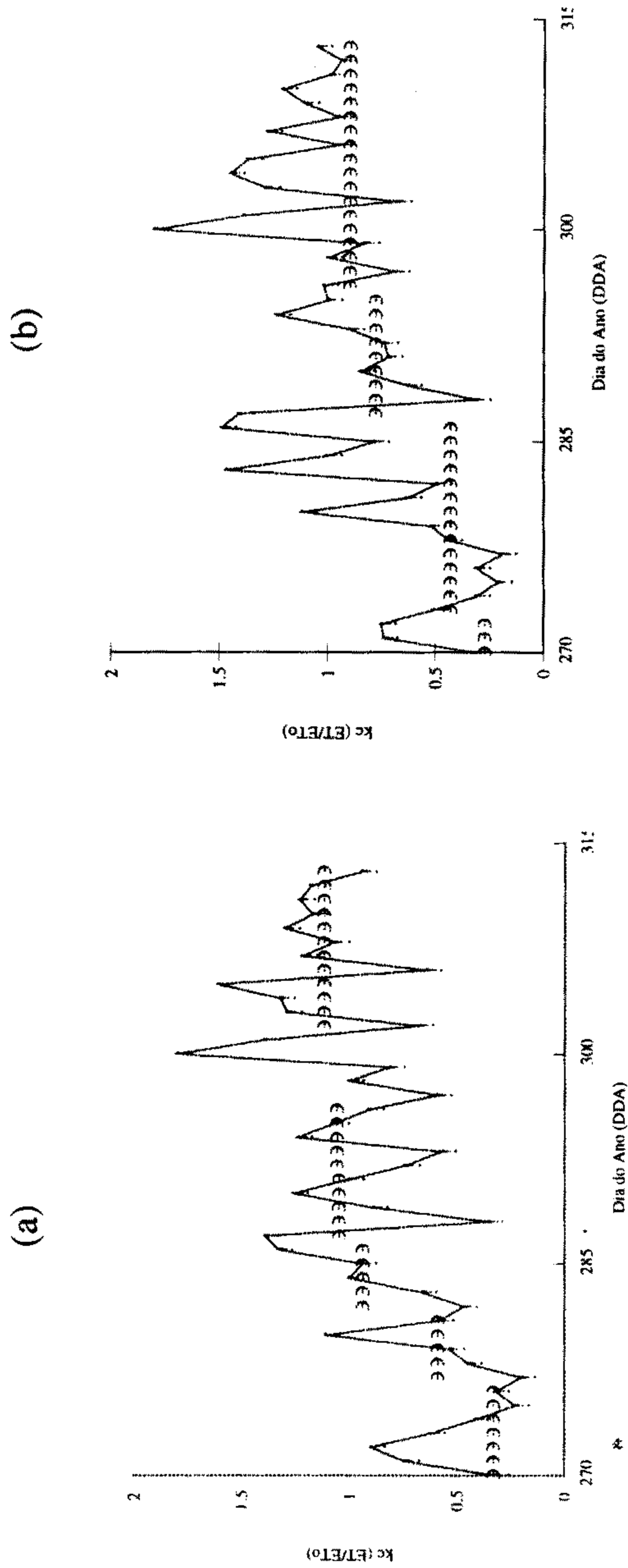


FIGURA 3 - Curva representativa do k_c estimado pelo método de Ritchie, dados diários (k_c RIT. DIÁRIO), versus k_c determinado pelo método do balanço de umidade do solo (k_c BAL.) em função do dia juliano, para a cultura do feijoeiro irrigado nas subparcelas de alta (a) e baixa (b) frequência irrigação.

QUADRO 1 - Valores de kc (medido, simulado e FAO) por estágio de desenvolvimento, para a cultura do feijoeiro e para a subparcela de alta frequência

CULTURA	KC Estádio 1			KC Estádio 2			KC Estádio 3		
	MED	SIM	FAO	MED	SIM	FAO	MED	SIM	FAO
FEIJÃO	0,66	0,66	0,62	1,10	1,05	0,71	1,16	1,16	1,05

MED = kc medido (ET medida / ETo simulada);

SIM = kc simulado (ET Ritchie / ETo simulada);

FAO = kc método FAO.

QUADRO 2 - Valores de kc (medido, simulado e FAO) por estágio de desenvolvimento, para a cultura do feijoeiro e para a subparcela de baixa frequência

CULTURA	KC Estádio 1			KC Estádio 2			KC Estádio 3		
	MED	SIM	FAO	MED	SIM	FAO	MED	SIM	FAO
FEIJÃO	0,39	0,56	0,36	0,74	0,98	0,71	0,94	1,18	1,05

MED = kc medido (ET medida / ETo simulada);

SIM = kc simulado (ET Ritchie / ETo simulada);

FAO = kc método FAO.

las irrigadas com frequência de 5 e 10 dias. O modelo de Ritchie foi testado para as condições edafoclimáticas de Viçosa, MG, por meio da comparação dos valores obtidos pelo método do balanço de água do solo com os valores simulados por aquele modelo. Nas condições em que o experimento foi conduzido conclui-se que o modelo de Ritchie simulou a evapotranspiração, para a subparcela irrigada com turno de rega de cinco dias com boa precisão e superestimou o seu valor na subparcela irrigada com turno de rega de dez dias. Esses resultados indicam que o modelo de Ritchie tem potencial para ser usado com sucesso em regiões que tenham característica climática semelhante à de Viçosa, MG.

5. SUMMARY

(THE RITCHIE MODEL FOR DETERMINING IRRIGATED DRY BEAN CROP (*Phaseolus vulgaris* L.) EVAPOTRANSPIRATION)

This field research was carried out at the Universidade Federal de Viçosa (UFV), during August-November 1994, to test the Ritchie evapotranspiration (ET) model for dry bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) 'Carioquinha' variety. The area was splitted into two plots, one with five day irrigation intervals and other with ten day irrigation intervals. It was concluded that the Ritchie model simulated the bean crop ET values very closely for plots irrigated with five day intervals but overestimated the ET values for plots with ten day irrigation intervals.

6. LITERATURA CITADA

1. BERNADO, S. *Manual de irrigação*. Viçosa, MG, UFV, 1989. 596p.
2. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizante em Minas Gerais*. 4ª Aproximação. Lavras, 1989. 176p.
3. DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. *Guidelines for prediction crop water requirements*. Rome, FAO. 1977. 144p. (Technical Note 24).
4. IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; JACKSON, R.D.; KIMBAL, B.A. & NAKAYAMA, F.S. The three stages of drying of a field soil. *Soil. Sci. Amer. Proc.*, 38 :831-837, 1974.
5. JONES, J.W. & RITCHIE, J.T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G. J.; HOWEL, T. A. & SOLOMON, K. H. (eds). *Management of farm irrigation systems*. St. Joseph, ASAE, 1990. p.63-89.
6. MANTOVANI, E. C. *Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: Estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos*. Córdoba, ETSIA, Univ. de Córdoba, 1993. 184p. (Tese D.S.).
7. PHILIP, J.R. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. *Journal of Meteorology*, 14: 354-366, 1957.
8. RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with a incomplete cover. *Water Resources Research.*, 8:1204-1213, 1972.
9. RODRIGUES, L. N. *Análise e teste do modelo de Ritchie: estudo de caso para a determinação da evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado*. Viçosa, MG, UFV, 1996. 78p. (Tese M.S.).