

MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E DE POTENCIAL MATRICIAL NO SOLO SOB GOTEJAMENTO COM EXTRAÇÃO DE ÁGUA POR RAÍZES¹

EUGENIO FERREIRA COELHO² e DANI OR³

RESUMO - A maior dificuldade em descrever e estimar a distribuição de água no bulbo molhado sob gotejamento reside na extração de água pelo sistema radicular, que é mais complexa devido à geometria de fluxo tridimensional. Os modelos existentes são, na maioria, unidimensionais ou multidimensionais de acessibilidade limitada. Este trabalho propõe um modelo semi-analítico para distribuição bidimensional de umidade ou de potencial no bulbo molhado, através da superposição da solução analítica de Warrick, para ponto-fonte em condições de regime não-permanente, com um modelo paramétrico de extração de água pelas raízes, considerando o balanço de água num volume unitário do solo. O modelo foi ajustado com sucesso a dados experimentais para a cultura do milho num solo franco-siltoso. Simulações de distribuição de água no bulbo molhado mostraram que o modelo permite estimar ou descrever a dinâmica de água do solo no bulbo molhado em qualquer tempo ao longo do ciclo de irrigação, o que pode contribuir significativamente na avaliação do manejo da irrigação, no estudo de posicionamento de sensores de umidade ou de potencial matricial, e em estudos relacionados à atividade das raízes no bulbo molhado.

Termos para indexação: irrigação por gotejamento, relação solo-água, absorção de água por raízes, simulação.

A MODEL FOR SOIL WATER AND MATRIC POTENTIAL DISTRIBUTION UNDER DRIP IRRIGATION WITH WATER EXTRACTION BY ROOTS

ABSTRACT - Water extraction by roots has been the main difficulty in describing and predicting a three-dimensional water distribution in the wetted volume under drip irrigation. The existing models consider either one-dimensional or multidimensional flow geometry, but in general, they are not easily accessible. This work introduces a two-dimensional semianalytical model for water content or potential distribution based on a superposition of the Warrick's analytical solution for transient flow from point source with a simple parametric model for root uptake. The model is also based on a local water balance, i.e., it considers a unit volume in a grid set in the wetted volume. The model results fitted well to the experimental data collected using corn plants in a Silt Loam Soil in containers. Simulations of water distribution in the wetted volume showed that the model allows to estimate and to describe soil water dynamics in the wetted volume during an irrigation cycle. This can improve significantly the evaluation of irrigation management, sensor placement studies and activity and distribution of roots in the wetted volume.

Index terms: drip irrigation, soil-water relationship, root water uptake, simulation.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos no meio agrícola, em face da incorporação de novas áreas

as ao processo produtivo, tanto no Brasil como em qualquer outra parte do mundo, tem aumentado as preocupações no que diz respeito ao uso racional de água de modo a não causar influências negativas ao meio ambiente. Neste contexto, a irrigação por gotejamento é o método de irrigação que apresenta melhores condições para atender esta crescente necessidade de uso adequado dos recursos hídricos, uma vez que proporciona maiores produtividades e melhor qualidade dos produtos, através da aplicação localizada de água, nutrientes e produtos químicos

¹ Aceito para publicação em 21 de novembro de 1997.

² Eng. Agr., Ph.D., Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura (CNPMPF), Caixa Postal 07, CEP 44380-000 Cruz das Almas, BA. E-mail: ecoelho@cnpmf.embrapa.br

³ Eng. Agr., Ph.D., Utah State University, Logan, UT, 84322-4820, USA. E-mail: dani@tal.agsci.usu.edu

cos com máxima eficiência, não poluindo os mananciais freáticos ou subterrâneos, e preservando assim a qualidade do meio ambiente.

O custo inicial dos métodos de irrigação localizada, em particular de gotejamento, é considerado como dos mais elevados, exigindo o uso de técnicas adequadas para obtenção de altos rendimentos que possam elevar a relação benefício:custo de um projeto. Assim, o manejo da irrigação deve receber especial atenção, principalmente na definição de quando e quanto de água a aplicar ao solo. Esses importantes parâmetros de manejo de irrigação têm sido, normalmente, determinados por meio de medições de potencial matricial ou umidade do solo no campo. Entretanto, o monitoramento da distribuição de água no bulbo molhado, que permite determinar com maior precisão o momento da irrigação, bem como o quanto de água a ser aplicada, pode ser feito por meio de modelos matemáticos. O uso desses modelos, apesar de, normalmente, não considerar todas as variáveis envolvidas no processo de redistribuição de água no bulbo molhado, pode ser extremamente útil em projetos e em manejo de irrigação, no que se refere à determinação de parâmetros de projeto como área molhada pelo gotejador, dimensões do bulbo molhado, eficiência dos sistemas, mapeamento da atividade do sistema radicular, e posicionamento de sensores de umidade e de potencial.

A equação multidimensional de Richards, que governa o fluxo não-saturado no meio poroso, pode ser linearizada com utilização da transformação de Kirchoff (ϕ) apresentada por Philip (1971):

$$\phi = \int_{-\infty}^h K(h) dh = \frac{K(h)}{h}, \quad (1)$$

onde $K(h)$ é a condutividade hidráulica não-saturada ($L.T^{-1}$), e h , o potencial matricial de água do solo (L). A condutividade hidráulica não-saturada pode ser obtida pelo modelo exponencial proposto por Gardner (1958):

$$K(h) = K_s e^{\alpha h}, \quad (2)$$

sendo K_s a condutividade hidráulica saturada, e α , um parâmetro relacionado à sorptividade do meio poroso, e representa a taxa de redução na condutividade hidráulica com a redução do potencial

matricial (L^{-1}). Esses valores variam de acordo com a faixa de umidade ou com o regime de umidade ou de potencial, dependendo da distância em relação ao emissor, e podem ser obtidos conhecendo-se a faixa de umidade ou de potencial a certa distância do emissor, pela curva $\ln[K(h)] \times h$, que pode ser derivada da curva de retenção (Van Genuchten, 1980). Neste caso, α é a declividade da curva no ponto correspondente ao valor médio de h , e K_s , o intercepto da tangente com o eixo $\ln[K(h)]$ de acordo com o método da declividade média móvel de Moldrup et al. (1989).

Warrick (1974) usou as equações (1) e (2) associadas à condição $dK/d\theta = k$, sendo k constante, para linearizar a equação da continuidade ou de Richards em termos de ϕ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{k}{\partial} \nabla^2 \phi - k \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad (3)$$

onde k pode ser obtido conforme metodologias sugeridas por Ben-Asher et al. (1978), ou pode ser derivado do modelo de Russo (1988), a partir da curva de retenção do solo associado ao modelo de Gardner (1958), de onde foi obtida a seguinte expressão:

$$k(\theta) = \frac{dK(\theta)}{d\theta} = -\frac{5K_s e^{0,6\alpha h} [(1 - 0,5\alpha h)]^{0,2}}{(\theta_s - \theta_r) \alpha h}, \quad (4)$$

em que θ_s corresponde à umidade de saturação, θ_r à umidade residual, e $K(\theta)$, à condutividade hidráulica não-saturada, em função da umidade volumétrica θ .

Warrick (1974) introduziu as variáveis adimensionais $R = \alpha r/2$, $Z = \alpha z/2$, $T = \alpha k t/4$, $\rho = (R^2 + Z^2)^{1/2}$, e $\Phi = 8\phi\pi/\alpha q$ para solucionar a equação 3, analiticamente sujeita à condição inicial $\phi(r, z, 0) = 0$, e à condição de contorno $(\partial\phi/\partial z) + \partial\phi = 0$ em $z = 0$, $r \neq 0$. A solução, considerando ponto-fonte abaixo da superfície do solo (exemplo: gotejador enterrado), pode ser dada como:

$$\Phi_B(R, Z, T) = \frac{e^Z}{2\rho} \left\{ e^{\rho} \operatorname{erf} \left(\frac{\rho}{2\sqrt{T}} + \sqrt{T} \right) + e^{-\rho} \operatorname{erf} \left(\frac{\rho}{2\sqrt{T}} - \sqrt{T} \right) \right\}, \quad (5)$$

e a solução, considerando ponto-fonte à superfície do solo:

$$\Phi(R, Z, T) = 2 \left\{ \Phi_B - e^{2Z} \int_Z^\infty e^{-2Z'} [\Phi_B]_{Z=Z'} dZ' \right\}, \quad (6)$$

em que a integral da eq. (5) pode ser dada pela fórmula de 15 pontos de Gauss-Legendre, com $Z' = Z + x/2$ (Sen et al., 1992), sendo a solução dada pela expressão:

$$\begin{aligned} \int_Z^\infty e^{-2Z'} [\Phi_B]_{Z=Z'} dZ' &= e^{-2Z} \int_0^\infty e^{-x} [\Phi_B]_{Z'=Z+\frac{x}{2}} \frac{dx}{2} \\ &= \frac{1}{2} e^{-2Z} \sum_{i=0}^x \omega_i [\Phi_B]_{Z'=Z+\frac{x_i}{2}}, \end{aligned} \quad (7)$$

onde ω_i corresponde aos pesos, e x_i , aos pontos amostrais que podem ser obtidos em Carnahan et al. (1969).

A distribuição de $\phi(r,z,t)$ ao longo do tempo, simulando infiltração e redistribuição de água durante e após a irrigação, podem ser obtidas da superposição das soluções apresentadas, uma vez que estas são lineares, gerando a seguinte expressão:

$$\Phi(R, Z, T) = \frac{\alpha}{8\pi} \sum_{i=0}^n (q_i - q_{i-1}) \Phi(R, Z, T - T_i), \quad (8)$$

com $q_{-1} = 0$, $T_0 = 0$ e $T > T_n$.

No caso de emissão de água em linha (linha fonte) enterrada, Lomen & Warrick (1974) obtiveram a seguinte solução para a eq. (3):

$$\Phi_B(X, Z, T) = \frac{e^Z}{2} \int_0^T \xi^{-1} \exp[-\xi - (X^2 + Z^2)/4\xi] d\xi, \quad (9)$$

onde $X = \alpha x/2$, $\phi = q\Phi_B/2\pi$ e ξ é uma variável auxiliar que representa o tempo adimensional. A solução da integral da eq. (9) pode ser obtida pela fórmula de 5 pontos Gauss-Legendre:

$$\int_0^T \xi^{-1} \exp[-\xi - (X^2 + Z^2)/4\xi] d\xi = \frac{T}{2} \sum_{i=0}^4 w_i f\left(\frac{z_i T + T}{2}\right), \quad (10)$$

onde w_i e z_i são apresentados conforme Carnahan et al. (1969).

Uma vez tendo as soluções para distribuição de ϕ num plano bidimensional, o valor do potencial matricial numa certa posição $h(r,z,t)$ do bulbo molhado pode ser determinado usando-se a transformação:

$$h(r, z, t) = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{\alpha \phi(r, z, t)}{K_s} \right]. \quad (11)$$

O valor da umidade $\theta(r,z,t)$ pode ser obtido usando-se $h(r,z,t)$ em qualquer modelo de retenção de umidade disponível, como o de Van Genuchten (1980). O único problema em se usar o modelo de Van Genuchten (1980), no caso, é que o valor de α ajustado pode ser diferente do valor usado nas equações anteriores. Assim, recomenda-se, numa primeira instância, usar o modelo de Russo (1988), para manter consistência nos valores de α :

$$\theta = \left[e^{0,5\alpha h} (1 - 0,5\alpha h) \right]^{0,8} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (12)$$

Assim, a distribuição de água no bulbo molhado pode ser determinada tanto durante o processo de infiltração decorrente da aplicação de água pelo emissor, como durante a fase de redistribuição de água entre o fim de uma irrigação até o início da próxima. Entretanto, a distribuição atual de umidade ou de potencial no bulbo molhado só pode ser completada com a inclusão da atividade do sistema radicular, que num regime adequado de irrigação torna-se o principal sumidouro no balanço de água.

Todos os modelos descritos assumem a distribuição de água em pontos de uma malha num plano que pode ser considerado perpendicular à direção da linha de emissores. Os modelos a seguir (eqs. 13 e 14) foram adaptados por Coelho & Or (1996), e determinam a extração de água em duas dimensões ($u[r,z]$), expressa como volume de água extraído, por volume de solo por tempo. São modelos paramétricos baseados em funções de densidade de probabilidade gaussianas em conformidade com diferentes distribuições de água no solo esperadas de acordo com a posição da planta e do gotejador. No caso, a região onde a extração de água ocorre, depende principalmente da posição do gotejador em relação à posição da planta, e da presença de interfaces, onde a extração é nula, tais como: (i) superfície do solo, (ii) regiões do bulbo molhado, onde as tensões de umidade são superiores à capacidade de absorção pelas raízes. A Fig. 1 ilustra duas configurações comumente esperadas em condições de campo para o caso do gotejador à superfície do solo ou enterrado. No primeiro caso, o modelo gaussiano semilogarítmico

é o mais adequado para descrever a distribuição da extração de água:

$$u(r, z) = \frac{\beta}{2\pi s_r s_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(r - m_r)^2}{s_r^2} + \frac{(\ln(z) - M_z)^2}{S_z^2} \right] \right\}, \quad (13)$$

Considerando o gotejador ou emissor enterrado, o modelo acima pode ser usado para casos de sistemas radiculares de pequena profundidade efetiva ou para linhas enterradas próximo à superfície do solo; outros casos poderão ser representados pelo modelo gaussiano normal:

$$u(r, z) = \frac{\beta}{2\pi s_r s_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(r - m_r)^2}{s_r^2} + \frac{(z - m_z)^2}{s_z^2} \right] \right\}, \quad (14)$$

onde $u(r, z)$ corresponde à fração de água extraída numa certa posição (r, z) do bulbo molhado em relação ao total de água extraída no plano, e m_r e s_r são as médias e o desvio-padrão, respectivamente, da distribuição de extração de água na direção radial; M_z e S_z são a média e desvio-padrão referente à coordenada transformada $\ln(z)$, e β é um parâmetro de escala. Os parâmetros m_r , s_r , M_z e S_z , e β são determinados por um processo de otimização em que a função objetiva representa o somatório do quadrado dos desvios entre os valores estimados pelo modelo

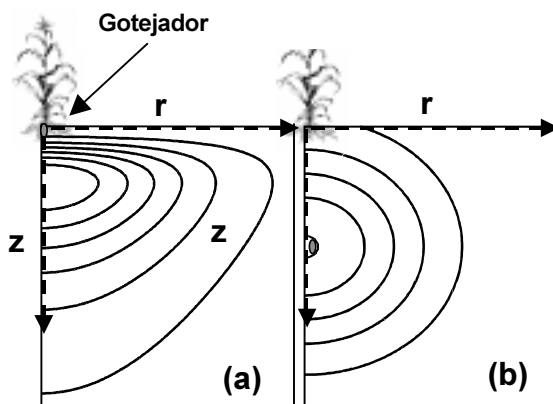


FIG. 1. Configurações comuns em sistemas de irrigação por gotejamento em condições de campo com padrões hipotéticos de extração de água pelo sistema radicular, considerando o gotejador na superfície do solo (a) e enterrado (b).

de extração e os dados observados, sendo as variáveis os parâmetros dos modelos. Coelho & Or (1996) determinaram esses parâmetros para a cultura do milho sob gotejamento em solo franco-siltoso, nos estágios correspondentes ao término do desenvolvimento vegetativo e floração.

A quantidade de água extraída ou a transpiração numa posição (r, z) no modelo proposto pode ser obtida a partir da evapotranspiração diária da cultura E_t e da área (A) sobre a superfície do solo correspondente ao plano perpendicular à direção da linha lateral de gotejamento. Neste caso, as perdas por percolação e evaporação não são consideradas. A transpiração diária ($T = A \cdot E_t$) no plano é convertida na transpiração numa posição (r, z) pelo seu produto pelo valor de $u(r, z)$, ou $T'(r, z) = T \cdot u(r, z)$, em unidades de umidade volumétrica ($L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$). Numa escala horária, a transpiração $\tau(r, z, t)$ é dada pela equação:

$$\tau(t) = \frac{T' \sin^4(\omega t)}{\int_0^{24} \sin^4(\omega t)}, \quad (15)$$

em que $\omega = 2\pi/P$, sendo P o período considerado, e t , o tempo atual (0 - 24 horas).

A umidade na posição (r, z) ou $\theta(r, z, t)$ será dada como resultado do balanço de água na posição (r, z) num dado tempo, levando-se em conta que os componentes do balanço são a umidade $\theta_f(r, z, t)$ resultante da infiltração e redistribuição de água (eq. 8) e a extração de água pelas raízes acumulada naquela posição desde o fim da última irrigação t_0 , ou $\Delta\theta_\tau(r, z, t - t_0)$, em que:

$$\Delta\theta_\tau(r, z, t) = \int_{t_0}^t \tau(r, z, t) dt. \quad (16)$$

Assim, ao fim de cada irrigação considera-se que o déficit de água é suprido pela irrigação, fazendo $\Delta\theta_\tau(r, z, t_0) = 0$. $\theta(r, z, t)$, ou a umidade atual, será dada pela equação:

$$\theta(r, z, t) = \theta_f(r, z, t) - \Delta\theta_\tau(r, z, t - t_0). \quad (17)$$

A seqüência de uso do modelo envolve os seguintes passos: a) definir o problema em termos de posição da linha lateral em relação à fileira de plantas e selecionar a equação de distribuição de água apropriada, ou seja: eq. 5 ou 6 para ponto-fonte enterrado ou à superfície do solo, respectivamente, e eq. 9 para

linha-fonte enterrada; b) usar a superposição temporal das soluções (eq. 8) para obter $\theta(r,z,t)$; c) determinar a fração da absorção de água pelas raízes em (r,z,t) , usando as eqs. 13 ou 14, dependendo da configuração do problema, e as eqs. 15 e 16, para determinar a quantidade de água extraída na mesma posição desde o fim da última irrigação; d) usar a eq. 17 para determinar a umidade atual e repetir os mesmos passos em outras posições.

A quantidade de água estimada, para ser aplicada numa irrigação (I), pode ser obtida integrando-se os valores atuais de umidade no espaço e no tempo pela equação:

$$I = \int_{t_0}^t \left[\int_0^Z \int_0^R \theta(r, z, t) dr dz \right] dt, \quad (18)$$

em que $\theta(r,z,t)$ é obtida da eq. 17, e Z e R correspondem aos limites no sentido horizontal e vertical, respectivamente, do plano ou da seção perpendicular à linha de gotejadores.

Os modelos numéricos ou analíticos de distribuição de umidade e de potencial matricial no bulbo molhado sob um gotejador, disponíveis na literatura, são normalmente limitados, devido principalmente à quantificação da água extraída do solo pelo sistema radicular entre duas irrigações. Muitos dos modelos são desenvolvidos para regime de fluxo em uma dimensão (Feddes et al., 1974; Molz, 1981; Jarvis, 1989). Os modelos analíticos existentes, usando geometria de fluxo em duas dimensões (Warrick et al., 1979; Warrick et al., 1980), apesar do mérito de serem desenvolvidos analiticamente da equação da continuidade ou de Richards, são complexos e limitados quanto à extração de água pelo sistema radicular. Os modelos numéricos disponíveis (Clausnitzer & Hopmans, 1994), ora demandam grande número de variáveis de entrada, ora encontram-se limitados pelos parâmetros referentes à extração de água pelo sistema radicular. É necessário desenvolver um modelo de distribuição da umidade que apresente as seguintes vantagens: 1. relativa simplicidade de aplicação, podendo ser executado por planilhas eletrônicas, como, por exemplo, Quattro Pro, Excell, ou equivalentes; 2. emprego de modelos analíticos e paramétricos de extração de água pelo sistema radicular, com resposta imediata às variáveis de entrada; 3. poucas variáveis de entrada.

Este trabalho teve por objetivo apresentar um modelo que ofereça as vantagens aqui assinaladas.

MATERIALE MÉTODOS

Validação do modelo

O modelo foi avaliado num experimento em casa de vegetação em que três plantas de milho foram cultivadas em caixas de 1,2 m por 0,8 m por 0,8 m. O solo usado no experimento foi o franco siltoso, com condutividade hidráulica saturada média de $0,021 \text{ m h}^{-1}$, densidade global de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$. A irrigação foi feita por gotejamento, com um gotejador autolimpante e autocompensante de vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, instalado na superfície do solo no centro de uma caixa de 1,0 m por 0,8 m por 0,8 m e a 0,3 m abaixo da superfície do solo, no centro de outra caixa de mesmas dimensões. Os dados de umidade foram coletados por um sistema portátil de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), em que as sondas foram instaladas numa malha de 0,1 m por 0,1 m, num plano perpendicular à direção da linha de irrigação limitado pela distância horizontal de 0,4 m a partir da planta, e pela profundidade de 0,7 m (Fig. 2). Nas mesmas posições radiais, mas às profundidades de 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m e 0,7 m, foram instalados tensiômetros com cápsulas porosas situadas próximo às

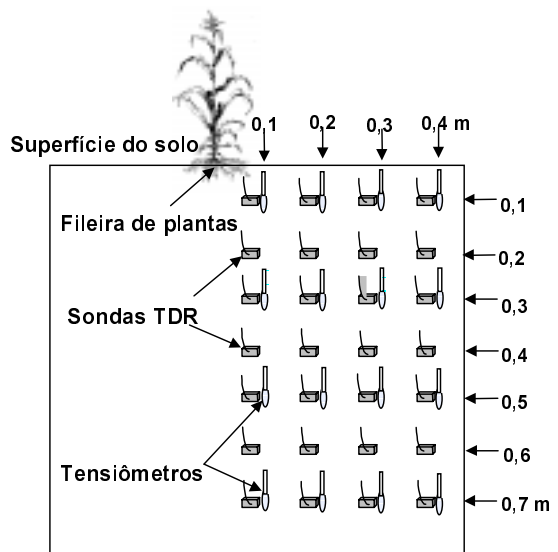


FIG. 2. Disposição das sondas de TDR e dos tensiômetros instalados na seção transversal do bulbo molhado perpendicular à direção da linha lateral de gotejamento.

sondas de TDR. As sondas de TDR foram conectadas a multiplicadores de leitura, que foram conectados a uma TDR Tektronix 1502B acoplada a um computador. As leituras dos tensiômetros foram feitas por meio de transdutores de pressão conectados a um multiplicador de leituras acoplado a um "datalogger". As leituras, em ambos os sensores, foram registradas a intervalos de dez minutos, durante dois ciclos de irrigação, no fim do desenvolvimento vegetativo e durante a floração da cultura.

Aplicação do modelo

A aplicação do modelo foi feita considerando a cultura do milho, 60 DAE (dias após emergência), gotejador de vazão $1,6 \text{ L h}^{-1}$, linha lateral junto à fileira de plantas, gotejador na superfície do solo e gotejador enterrado a $0,3 \text{ m}$ de profundidade. As simulações foram feitas assumindo $\Delta x = \Delta z = 0,1 \text{ m}$ para a malha inserida no plano de $0,7$ por $0,65 \text{ m}$ perpendicular à linha lateral. As propriedades físicas α e K_s do solo franco-siltoso foram determinadas com base em regimes reais de umidade verificados nos experimentos. Algumas faixas de umidade foram selecionadas, e foi empregado o método da declividade média móvel de Moldrup et al. (1989) utilizando-se a curva de retenção e a curva da condutividade hidráulica não-saturada (Fig. 3). Os valores de $k(\theta)$ foram obtidos durante a validação do modelo, ou foram calculados usando-se a eq. 4. A Tabela 1 contém todos os parâmetros de solo requeridos para as simulações, usando-se o modelo proposto. As simulações foram feitas com referência a dois ciclos de irrigação, em que a transpiração diária da cultura foi de 4 mm d^{-1} , e os intervalos de irrigação considerados nas simulações foram de um e dois dias. As simulações foram feitas em planilhas eletrônicas (Quattro Pro).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validação do modelo

As Figs. 4 e 5 ilustram o ajuste do modelo aos dados experimentais, onde a linha mais fina dos gráficos representa as soluções analíticas de Warrick (1974) relativas ao ponto-fonte, que considera somente a infiltração e redistribuição de água no solo.

O efeito da extração de água pelas raízes é claramente reconhecido pelo modelo proposto, que mostra decréscimo da umidade durante o período diurno, com uma estabilização no período noturno, quando a transpiração se anula. Em geral, o modelo apresentou resultados de umidade atual muito próximo da umidade coletada pelas sondas de TDR.

A importância de se poder fazer monitoramento contínuo usando-se alta resolução é evidenciada pelas leituras das sondas de TDR, que permitem diferenciar claramente a variação temporal da umidade no período diurno e no período noturno, pela taxa de redução da umidade nesses períodos.

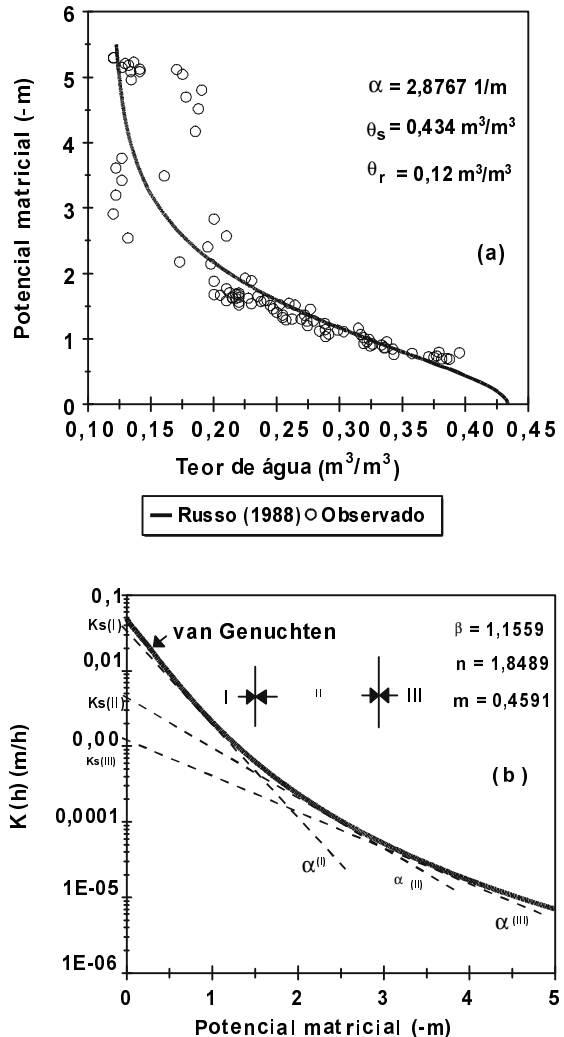


FIG. 3. (a) Curva de retenção de água do solo ajustada aos dados conforme Russo (1988); (b) Determinação dos parâmetros α e K_s em diferentes intervalos de h conforme o regime de potencial de água do solo pelo método da declividade média móvel de Moldrup et al. (1989).

TABELA 1. Parâmetros físico-hídricos do solo usados nos modelos durante as simulações¹.

Posição do gotejador	Int. irrig. (d)	DAE	r (m)	z (m)	α (m ⁻¹)	K_s (m h ⁻¹)	$k(\theta)$ (m h ⁻¹)
Superfície do solo	1, 2	50	0-0,3	0-0,3	2,55 ^I	0,049 ^I	0,003
	1, 2	50	0-0,4	0,4-0,5	1,4 ^{II}	0,004 ^{II}	0,0015-0,0025
Superfície do solo	2	60	0-0,3	0-0,3	2,8	0,049	0,004
	2	60	0-0,4	0,4-0,5	1,5	0,04	0,0025
Enterrado	1	60	0-0,4	0,2-0,3	2,7	0,025	0,005
	1	60	0-0,4	0,1;0,4-0,5	1,1	0,004	0,0035
	2	50, 60	0-0,3	0,2-0,4	2,4	0,025	0,0025
	2	50, 60	0-0,3	0,5	1,5	0,004	0,0015
	2	50, 60	0-0,3;0,4	0,1;0,6	1,1 ^{III}	0,001 ^{III}	0,0015

¹ I, II, III para α e K_s referem-se aos valores α (I), α (II), α (III), e K_s (I), K_s (II), K_s (III) na Fig. 3.

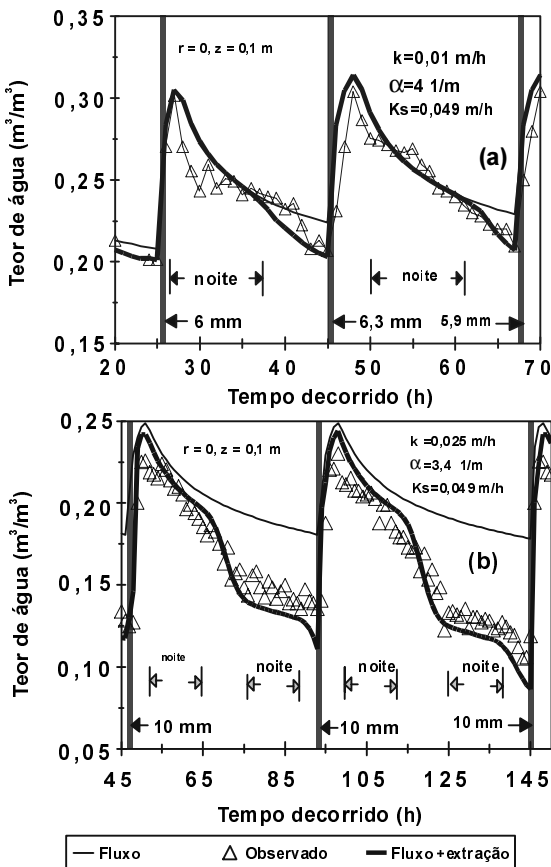


FIG. 4. Valores de umidade durante dois ciclos de irrigação estimados pelo modelo de Warrick (1974) e pelo modelo semi-analítico proposto, e medidos em uma posição do bulbo molhado para intervalos de irrigação de (a) um e (b) dois dias, considerando o gotejador na superfície do solo.

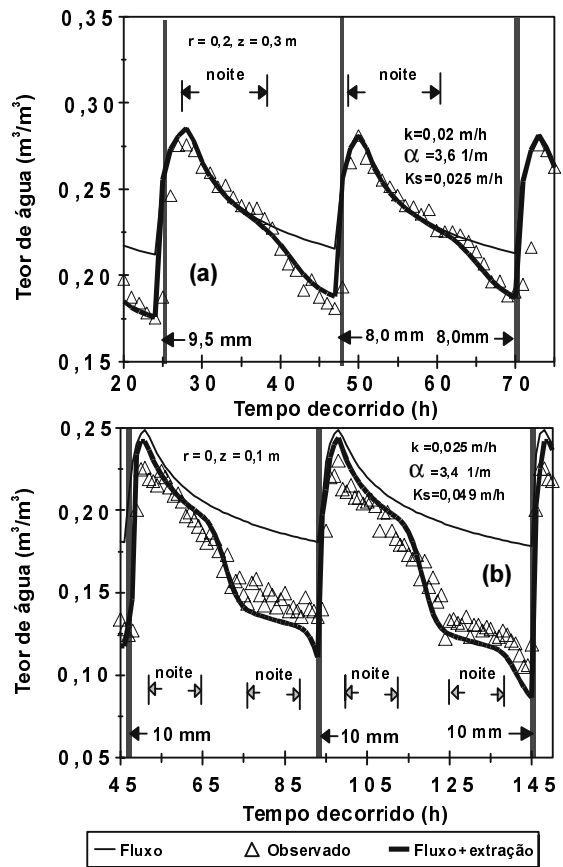


FIG. 5. Valores de umidade durante dois ciclos de irrigação estimados pelo modelo de Warrick (1974) e pelo modelo semi-analítico proposto, e medidos em uma posição do bulbo molhado em intervalos de irrigação de (a) um e (b) dois dias, considerando o gotejador enterrado a 0,3 m de profundidade.

Os resultados colocam o modelo proposto como um significativo passo na descrição realística da dinâmica da água no solo no bulbo molhado sob gotejamento, considerando a extração de água pelo sistema radicular.

Desta forma, o modelo pode ser usado para simular diferentes situações de manejo de irrigação, principalmente considerando o intervalo de irrigação e o uso da água pela cultura.

Sensitividade do modelo

Uma análise de sensibilidade do modelo foi feita para o caso do gotejador enterrado à profundidade $z=0,3$ m e distância radial do gotejador $r=0,1$ m. Foi inserida uma variação de $\pm 20\%$, $\pm 40\%$ e $\pm 60\%$ aos parâmetros de fluxo e de extração de água pelas raízes que resultaram em melhor desempenho do modelo. Nenhuma variação foi imposta ao parâmetro m_r da eq. 14, uma vez que, na prática, este parâmetro não é esperado como significativamente diferente de zero.

O desvio percentual (DP) entre os valores de umidade calculados (θ_c) pelo modelo relativo aos valores experimentais (θ_e) foi computado como:

$$DP = 100 \left| \frac{\theta_c - \theta_e}{\theta_e} \right|. \quad (19)$$

Os valores de DP médio ao longo de dois ciclos de irrigação obtidos para cada variação nos parâmetros de fluxo e de extração de água se encontram na Tabela 2.

Os maiores desvios (DP) foram observados quando m_z , s_r e s_z foram alterados simultaneamente. Quando apenas um parâmetro foi alterado os maiores valores de DP corresponderam à variação em s_z , seguido por m_z e s_r . Nota-se, pela Tabela 2, que α foi o parâmetro da mais alta sensibilidade do modelo, o que era esperado, uma vez que qualquer mudança no valor de α causa variação exponencial no valor da condutividade hidráulica. Os outros parâmetros (K_s e $k(\theta)$) têm efeito linear nos cálculos, e a influência da sua variação não foi relevante (Tabela 2).

Aplicação do modelo

As simulações conduzidas geraram valores de potencial matricial e de umidade em todas as posições da malha do plano perpendicular à linha lateral de gotejamento. Valores estimados do potencial matricial com o tempo são apresentados para algumas posições no sentido diagonal e vertical do bulbo molhado (Figs. 6 e 7), considerando-se o gotejador na superfície do solo ou enterrado, em um e dois dias de intervalo de irrigação. Essas figuras ilustram os diferentes regimes de potencial em função da posição no bulbo molhado.

As altas oscilações observadas no potencial matricial, nas posições mais próximas do gotejador ($r=0$, $z=0,1$ m, no caso do gotejador na superfície do solo, e $r=0$, $z=0,3$ m, no caso do gotejador enterrado), indicam a alta influência da extração de água pelas raízes nestas posições, particularmente em dois dias de intervalo de irrigação.

TABELA 2. Valores do desvio percentual (DP, %) e desvio-padrão dos valores de DP obtidos durante dois ciclos de irrigação.

Perc. de variação nos parâmetros	Parâmetros de extração			Parâmetros de fluxo			
	m_z	s_z	s_r	m_z, s_z, s_r	$k(\theta)$	K_s	α
-20	5,3 (0,07)	8,8 (0,091)	4,9 (0,054)	4,4 (0,053)	4,1 (0,048)	5,6 (0,065)	21,2 (0,055)
-40	9,5 (0,095)	12,0 (0,105)	6,0 (0,058)	10,2 (0,099)	5,2 (0,044)	10,2 (0,072)	41,4 (0,066)
-60	13,3 (0,039)	20,8 (0,174)	7,4 (0,067)	23,5 (0,106)	7,4 (0,055)	17,7 (0,081)	54,1 (0,052)
+20	3,9 (0,053)	5,6 (0,071)	5,1 (0,068)	7,4 (0,082)	4,2 (0,066)	4,3 (0,052)	20,9 (0,079)
+40	4,0 (0,059)	7,9 (0,085)	7,2 (0,081)	11,8 (0,112)	4,8 (0,074)	5,7 (0,049)	36,9 (0,121)
+60	6,4 (0,076)	9,8 (0,097)	8,8 (0,09)	15,0 (0,137)	5,5 (0,081)	7,3 (0,047)	50,0 (0,165)

As amplitudes de variação do potencial matricial reduzem-se com a distância do gotejador, da mesma forma que a média temporal dos potenciais também se reduz à medida que se afasta do gotejador, o que indica redução na atividade do sistema radicular nestas posições. Estes resultados dão suporte para iden-

tificar o centro de extração de água pelas raízes, que, no caso, apesar dos poucos pontos, dão idéia da posição desses centro, próxima do gotejador, tanto na superfície do solo como enterrado.

Estas informações podem ser muito úteis em manejo de irrigação, não só no que se refere à antecipa-

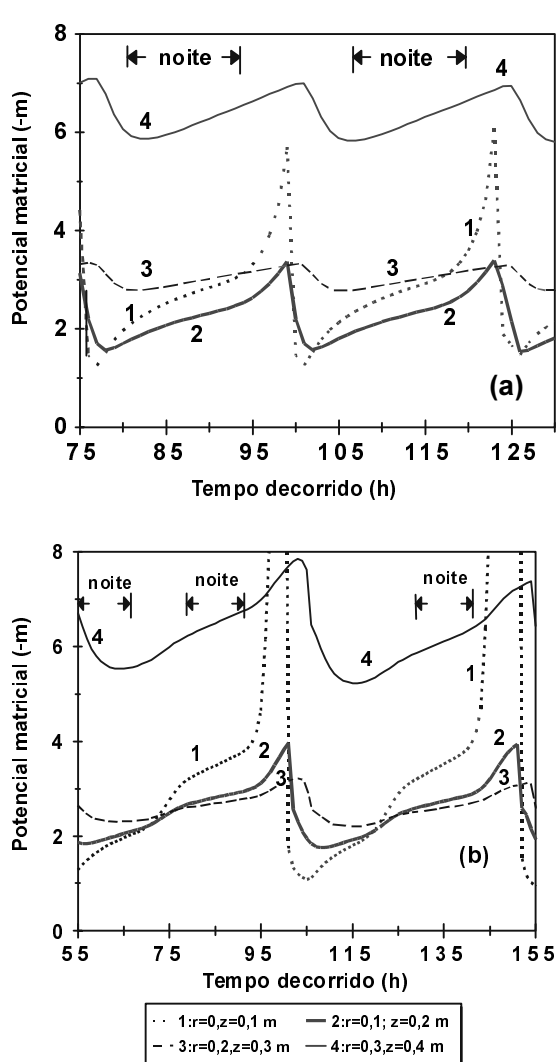


FIG. 6. Valores de potencial matricial estimados pelo modelo proposto durante dois ciclos de irrigação da cultura do milho aos 60 DAE, em diferentes posições do bulbo molhado, com o gotejador na superfície do solo, para intervalos de irrigação de (a) um e (b) dois dias.

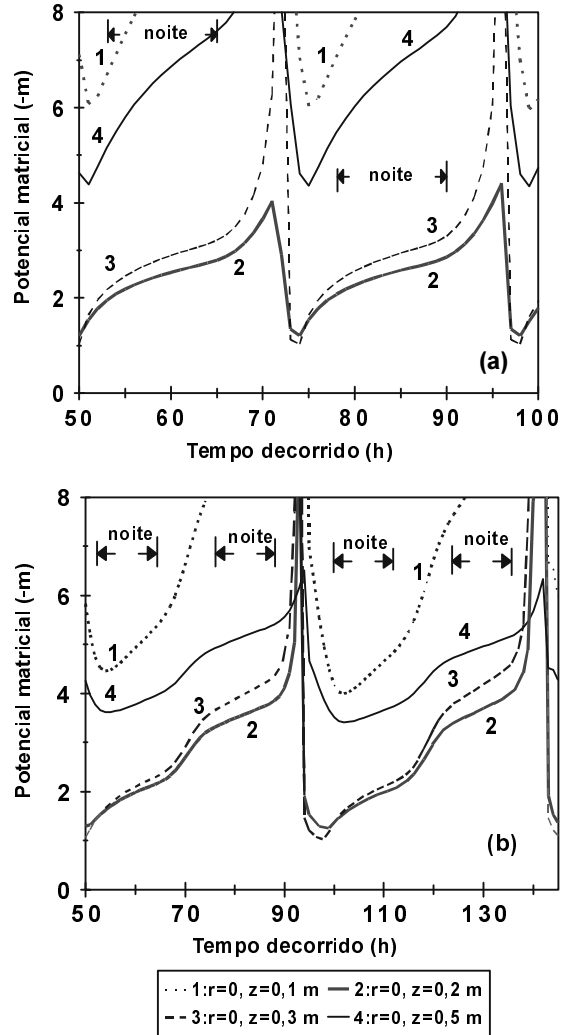


FIG. 7. Valores de potencial matricial estimados pelo modelo proposto durante dois ciclos de irrigação da cultura do milho aos 60 DAE, em diferentes posições do bulbo molhado, com o gotejador enterrado a 0,3 m de profundidade, em intervalos de irrigação de (a) um e (b) dois dias.

ção do conhecimento de quando e de quanto de água aplicar, mas também para definir zonas para melhor monitoramento da água do solo, por sensores de potencial matricial ou de umidade. Tais informações têm utilidade também no estudo de distribuição de solutos ou nutrientes via água de irrigação, uma vez que a absorção de água e de nutrientes ocorre a um só tempo.

CONCLUSÕES

1. Os valores de umidade estimados pelo modelo são próximos dos valores experimentais.

2. Maiores desvios percentuais entre os valores estimados pelo modelo e os observados são esperados quando m_z , s_1 e s_z são alterados simultaneamente.

3. O parâmetro α é o de mais alta sensibilidade do modelo.

4. O modelo permite avaliar o manejo de irrigação e a atividade das raízes no bulbo molhado, e contribui na definição do posicionamento de sensores de umidade ou de potencial no solo.

REFERÊNCIAS

- BEN-ASHER, J.; LOMEN, D.O.; WARRICK, A.W. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source. **Soil Science Society of America. Journal**, v.42, p.3-6, 1978.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, J.O. **Applied numerical methods**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 625p.
- CLAUSNITZER, V.; HOPMANS, J.W. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. **Plant and Soil**, v.164, p.299-314, 1994.
- COELHO, E.F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America. Journal**, v.60, p.1039-1049, 1996.
- FEDDES, R.A.; BRESLER, E.; NEUMAN, S.P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. **Water Resources Research**, v.10, n.6, p.1199-1205, 1974.
- GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. **Soil Science**, v.85, p.228-232, 1958.
- JARVIS, N.J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, v.107, p.57-72, 1989.
- LOMEN, D.O.; WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration: II. Line sources. **Soil Science Society of America. Proceedings**, v.38, p.568-572, 1974.
- MOLDRUP, P.; ROLSTON, D.E.; HANSEN, J.A. Rapid and numerically stable simulation of one-dimensional, transient water flow in unsaturated layered soils. **Soil Science**, v.148, n.3, p.219-226, 1989.
- MOLZ, F.J. Interaction of water uptake and root distribution. **Agronomy Journal**, v.56, p.35-41, 1981.
- PHILIP, J.R. General theorem on steady state infiltration from surface sources, with application to point and line sources. **Soil Science Society of America. Proceedings**, v.35, p.867-871, 1971.
- RUSSO, D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for hydraulic properties. **Water Resources Research**, v.24, p.453-459, 1988.
- SEN, H.S.; PAUL, D.; BANDYOPADHYAY, K.; DASH, N.B. A simple numerical solution for two-dimensional moisture distribution under trickle irrigation. **Soil Science**, v.154, n.5, p.350-356, 1992.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America. Journal**, v.44, p.892-898, 1980.
- WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. **Soil Science Society of America. Proceedings**, v.38, p.383-386, 1974.
- WARRICK, A.W.; AMOOZEGAR-FARD, A.; LOMEN, D.O. Linearized moisture flow from line sources with water extraction. **Transactions of the ASAE**, v.22, p.549-553, 1979.
- WARRICK, A.W.; LOMEN, D.O.; AMOOZEGAR-FARD, A. Linearized moisture flow with root extraction for three-dimensional, steady conditions. **Soil Science Society of America. Journal**, v.44, p.911-914, 1980.