

MODELOS ANALÍTICOS PARA PREDIÇÃO DO PROCESSO DA REDISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO⁽¹⁾

J. M. T. LOYOLA⁽²⁾ & C. L. PREVEDELLO⁽³⁾

RESUMO

A avaliação do processo da redistribuição da água no solo, em condições de campo, demanda considerável tempo e apreciável custo, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas a freqüentes alterações no tempo. O presente trabalho propõe dois modelos analíticos para estimar a dinâmica desse processo, a partir da adoção do gradiente de potencial hidráulico unitário na equação de Richards. O primeiro modelo estima a umidade do solo e o segundo estima a densidade de fluxo, ambos de acordo com o tempo de drenagem interna para a profundidade de interesse. Os resultados gerados pelos modelos confrontam-se satisfatoriamente física e estatisticamente com os valores medidos da umidade e densidade de fluxo durante o período de drenagem em diferentes profundidades numa Areia Marinha submetida a esse processo em condições de campo. Os modelos propostos exigem somente o conhecimento prévio dos dados da curva de retenção e da condutividade hidráulica do solo na profundidade de interesse.

Termos de indexação: redistribuição da água no solo, equação de Richards, modelos analíticos.

SUMMARY: *ANALYTICAL MODELS TO ESTIMATE THE SOIL WATER REDISTRIBUTION PROCESS*

Field assessments of the water redistribution process are time consuming and costly because hydraulic soil properties vary extensively in space and time. The present work proposes two analytical models to estimate the dynamics of this process, based on the use of the hydraulic unit potential gradient of Richard's equation. The first model estimates the soil water content and the second flow density, both as functions of time for internal drainage

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal do Paraná – UFPR em maio de 2002. Recebido para publicação em junho de 2002 e aprovado em junho de 2003.

⁽²⁾ Professor Assistente do Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Caixa Postal 19011, CEP 81531-990 Curitiba (PR). E-mail: tloyola@uol.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR. E-mail: clpreve@ufpr.br

at a given depth. From statistical and physical points of view, there was agreement between the model and the measured values of water content and flow density at different depths during the drainage phase of a morphologically homogeneous beach sand. The only input required by the proposed models are the data of water retention and soil hydraulic conductivity at a given depth.

Index terms: soil water redistribution, Richard's equation, analytical models.

INTRODUÇÃO

O solo é o reservatório natural de água para as plantas e todas as práticas de manejo na agricultura visam promover condições ideais para o crescimento das culturas. Por ser um reservatório aberto para a atmosfera e para os horizontes ou camadas mais profundas do perfil de solo, muitos investigadores têm procurado quantificar a capacidade de armazenamento desse reservatório (retenção de água), como também os fluxos que ocorrem tanto na superfície (infiltração e evaporação) quanto na profundidade no solo (drenagem interna). Esses fluxos que ocorrem dentro do solo fazem parte de importantes processos do ciclo hidrológico. Findado o processo da infiltração, por exemplo, o movimento da água dentro do perfil de solo não cessa imediatamente e pode persistir por muito tempo. Esse movimento pós-infiltração é denominado drenagem interna ou redistribuição e se caracteriza em aumentar a umidade de camadas mais profundas pela água contida nas camadas superficiais inicialmente umedecidas (Jury et al., 1991).

A avaliação desse processo no campo envolve gastos de tempo e dinheiro, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas a freqüentes alterações no tempo (Prevedello, 1996; Centurion et al., 1997).

A compreensão e a avaliação do processo de redistribuição da água no solo são muito úteis para a Ciência do Solo e Engenharia Civil, particularmente em assuntos relacionados com a irrigação, drenagem, erosão, biologia da fauna e flora do solo, lixiviação de elementos químicos e orgânicos, poluição do solo e da água, dentre outros, porque a água que drena do perfil de solo pode ser um importante fator causador de vários problemas ambientais. Em muitas regiões do mundo, por exemplo, a água que drena subsuperficialmente dos solos tem contribuído para a poluição de rios e degradação de terras agrícolas pela formação de depósitos salinos, uma vez que a concentração de sais na água de drenagem dos solos severamente salinizados pode atingir valores de até 3 % (Prevedello, 1996).

Na engenharia civil, a redistribuição da água também é importante, porque, em barragens de terra, por exemplo, a determinação da quantidade de água que percola dos maciços e fundações é

fundamental para a estabilidade da obra, enquanto, em lagoas de rejeitos, essa percolação pode contribuir na contaminação do lençol freático (Souza Pinto, 2000).

As estimativas da taxa e quantidade de água de drenagem que contribuem para as camadas mais profundas do solo são muito investigadas (Sisson et al., 1980), e o conhecimento dos fatores que determinam as perdas de água do solo por drenagem interna pode permitir a adoção de técnicas que objetivem controlá-la. Outra questão importante é um melhor entendimento das taxas de recarga de aquíferos. Além disso, essas estimativas constituem poderoso instrumento de avaliação para técnicos de áreas afins ou interessados em estudos hidrológicos, mediante uso em programas de computação de fácil acesso e manuseio.

Visando estimar o processo de redistribuição, este trabalho objetiva desenvolver modelos analíticos que se baseiam na adoção de algumas simplificações nas leis que governam a dinâmica da água em meios porosos, bem como confrontá-los com os valores medidos da umidade e da densidade de fluxo, ambos de acordo com o tempo, em diferentes profundidades, de uma Areia Marinha, em condições de campo.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Equação de Richards para gradiente hidráulico unitário

Após cessada uma chuva ou irrigação num perfil de solo homogêneo, os perfis de umidade transladam-se no tempo de forma que a tangente $d\theta/dz$ é aproximadamente nula na zona úmida, o que implica $d\phi_m/dz=0$, sendo ϕ_m o potencial mátrico (mH_2O), θ a umidade ($m^3 m^{-3}$) e z a coordenada de posição (m). Além disso, a tangente $d\theta/dt$, sendo t o tempo (s), não varia com a profundidade, porque os perfis de umidade na zona úmida transladam-se paralelamente, já que a drenagem interna nessa zona é uniforme. Com essas aproximações, a equação de Richards simplifica-se em:

$$\frac{d\theta}{dt} dz = dK(\theta) \quad (1)$$

A equação (1) integrada (admitindo que $d\theta/dt$ não varia com a profundidade) entre os limites $z = 0$ (superfície do solo) e $z = -L$ (profundidade de interesse) produz:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{K(\theta)}{L} \quad (2)$$

Se a função $K(\theta)$ for conhecida, então a equação (2) poderá ser integrada e resultar numa expressão que define a dependência temporal da umidade durante o processo da redistribuição da água no solo.

Van Genuchten (1980) propôs a seguinte equação empírica e muito eficiente para representar analiticamente a curva de retenção de água no solo:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha|\phi_m^n\right]^m} \quad (3)$$

em que α , θ_r , θ_s , n e m ($m = 1-1/n$) são parâmetros independentes

Esse autor, então, introduziu a equação (3) na teoria de Mualem (1976), para obter a seguinte expressão analítica para a função $K(\theta)$:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/2} \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/m}\right]^m\right\}^2 \quad (4)$$

A substituição de $K(\theta)$ da equação (4) na equação (2) resulta numa equação extremamente complexa para ser integrada, e a causa dessa complexidade reside no termo unitário presente no denominador da equação (3). Se esse termo for desprezado, o que implica que as análises futuras somente serão válidas para $|\alpha\phi_m| \gg 1$ (ou $|\phi_m| \gg 1/\alpha$), então o modelo de Van Genuchten (1980) simplifica-se em:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(\alpha\phi_m)^{n-1}} \quad (5)$$

Com isso, a introdução da equação (5) na teoria de Mualem (1976) resulta em

$$K(\phi_m) = K_s \left(\frac{1}{\alpha\phi_m}\right)^{2+2,5(n-1)} \quad (6)$$

Pelo arranjo da equação (5), obtém-se

$$\frac{1}{\alpha\phi_m} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{n-1}}, \text{ que, substituída na (6), produz:}$$

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{2,5 + \frac{2}{n-1}} \quad (7)$$

Substituindo (7) em (2), obtém-se:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{K_s}{L} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{2,5 + \frac{2}{n-1}} \quad (8)$$

A integração da (8) entre os limites $\theta = \theta_s$ no tempo $t = 0$ e $\theta = \theta$ no tempo $t = t$ resulta em:

$$\theta = \left[(\theta_s - \theta_r)^{1-\gamma} - \frac{(1-\gamma)K_s t}{L(\theta_s - \theta_r)^\gamma} \right]^{\frac{1}{1-\gamma}} + \theta_r$$

sendo
$$\gamma = 2,5 + \frac{2}{n-1} \quad (9)$$

A equação (9) permite conhecer a umidade do solo na profundidade de interesse L , de acordo com o tempo de redistribuição da água, já que todos os demais parâmetros da equação são conhecidos.

Para predição da densidade de fluxo gravitacional de acordo com o tempo de redistribuição da água no solo, com base no modelo de retenção de Van Genuchten (1980), basta derivar a equação (9) com respeito ao tempo, o que resulta para a densidade de fluxo gravitacional:

$$\frac{d\theta}{dt} L = J = -\frac{K_s}{(\theta_s - \theta_r)^\gamma} \left[(\theta_s - \theta_r)^{1-\gamma} - \frac{(1-\gamma)K_s t}{L(\theta_s - \theta_r)^\gamma} \right]^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$$

sendo
$$\gamma = 2,5 + \frac{2}{n-1} \quad (10)$$

MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar o desempenho dos modelos analíticos desenvolvidos, foram utilizados dados obtidos por Cho et al. (1977) para uma Areia Marinha submetida ao processo da redistribuição da água em condições de campo. O trabalho consistiu em saturar de água uma parcela experimental de 5,0 por 5,0 m e monitorar a umidade e tensão durante vários dias, mantendo coberta a superfície dessa parcela com uma lona plástica para evitar fluxos de água por evaporação ou infiltração. O experimento foi realizado na ausência do lençol freático. Para obter os valores de ϕ_m , foram utilizados tensiômetros e, para os valores de θ , foi utilizada sonda de nêutrons.

Parametrização dos modelos propostos

Os parâmetros m , θ_r , θ_s das equações 9 e 10 foram estimados a partir do ajuste do modelo de Van Genuchten (1980) aos dados da curva de retenção, isto é, do potencial mátrico, ϕ_m , e da umidade volumétrica, θ , para cada profundidade de interesse, utilizando os dados apresentados nos trabalhos de Cho et al. (1977). Para tanto, fez-se uso de um programa de regressão não-linear que emprega a técnica dos mínimos quadrados, conforme Boratto (1984). As profundidades consideradas foram 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; e 1,00 m. Esses parâmetros foram, então, devidamente utilizados nos modelos propostos neste trabalho, para estimar os perfis de umidade e as densidades de fluxo de acordo com o tempo de redistribuição nessas profundidades, e confrontados

estatisticamente com os valores medidos pelo teste estatístico de “Kolmogorov-Smirnov” (K-S) do programa estatístico Statgraphics. Segundo Mendenhall (1985), os testes não-paramétricos são muito úteis e freqüentemente mais poderosos do que os métodos paramétricos, para detectar diferenças entre populações, desde que para esses últimos seja satisfeita a suposição da distribuição normal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Umidade de acordo com o tempo de redistribuição

O quadro 1 mostra os valores de α , m , n , θ_r e θ_s , obtidos no ajuste do modelo de Van Genuchten (1980) aos dados da curva de retenção, para as diversas profundidades de interesse. Também são apresentados os valores de condutividade hidráulica saturada, K_s , e dos coeficientes de determinação, os quais, como se observa, foram superiores 0,97.

Esses parâmetros foram devidamente substituídos na equação (9), para estimar os valores de umidade de acordo com o tempo de drenagem para as diversas profundidades (Figura 1), a fim de facilitar a comparação entre eles. Como se observa na figura 1, de a até e, os valores estimados aproximam-se muito bem dos observados durante todo o tempo de redistribuição da água, em todas as profundidades. Pequenos desvios, entretanto, são notados para tempos iniciais do processo, particularmente nas profundidades superiores a 0,40 m em que a umidade estimada é sempre menor que a observada.

Quadro 1. Valores dos parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980) aos dados da curva de retenção da Areia Marinha

Parâmetro	Profundidade				
	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
	m				
K_s ($m\ s^{-1}\ 10^{-4}$) ⁽¹⁾	1,120	1,470	1,620	1,620	1,320
θ_r ($m^3\ m^{-3}$)	0,045	0,071	0,083	0,072	0,090
θ_s ($m^3\ m^{-3}$)	0,320	0,328	0,333	0,329	0,325
α (m^{-1})	5,001	3,965	3,923	3,984	3,656
n	3,411	7,954	10,89	7,714	8,542
m	0,707	0,874	0,908	0,870	0,883
r^2	0,972	0,999	0,994	0,999	0,996

⁽¹⁾ Os valores de K_s foram obtidos em condições de campo por CHO et al. (1977).

Isso pode ser atribuído, de um lado, à própria característica do processo da redistribuição, que resulta em aumentar a umidade das camadas mais profundas pela água contida nas camadas superficiais inicialmente saturadas, e, de outro lado, à simplificação adotada na teoria proposta, quando se eliminou o termo unitário no denominador da equação de Van Genuchten (1980) para a curva de retenção, visto que, como se observou no item considerações teóricas, a eliminação desse termo implicaria uma limitação da teoria se não fosse atendida a relação $|\phi_m| \gg 1/\alpha$.

Essa imposição, aliás, é difícil de ser atendida nos tempos iniciais da redistribuição da água no solo,

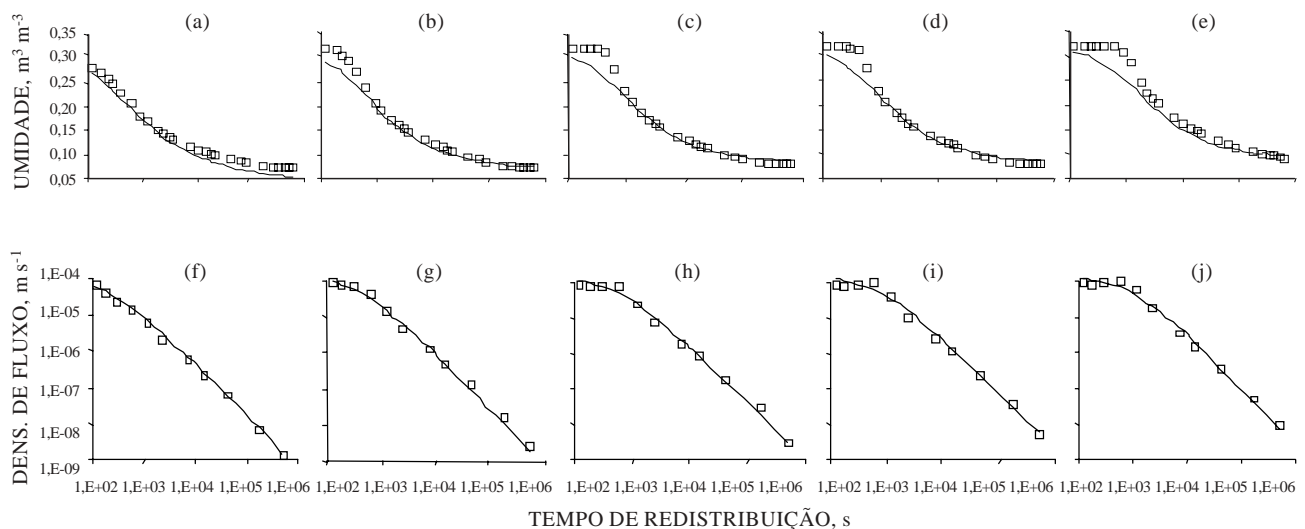


Figura 1. Umidade e densidade de fluxo de acordo com o tempo de redistribuição da água em diferentes profundidades de uma Areia Marinha. Símbolos referem-se a valores medidos e linhas referem-se a valores estimados pela equação (8), no caso da umidade, e pela equação (9), no caso da densidade de fluxo. As letras de a até e, e de f até j representam, respectivamente, as profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00 m.

quando este ainda se encontra próximo da saturação. Mesmo assim, esses desvios não foram suficientes para influenciar o desempenho do modelo proposto, do ponto de vista estatístico, porque o teste K-S (Kolmogorov-Smirnov) revelou não haver diferença significativa entre os valores estimados e observados, a 5 % de significância, em todas as profundidades consideradas.

Densidade de fluxo de acordo com o tempo de redistribuição

Os valores estimados da densidade de fluxo nas diversas profundidades foram obtidos a partir da equação (10) e estão apresentados na figura 1, de f até j. Como se observa, o modelo proposto (equação 10) ajustou-se muito bem aos valores experimentais durante todo o período de redistribuição, em todas as profundidades. Não se notam desvios entre os valores estimados e observados de densidade de fluxo nos tempos iniciais da redistribuição, muito provavelmente porque essas diferenças foram pequenas para provocar diferenças importantes na condutividade hidráulica e, por conseguinte, na densidade de fluxo.

O teste estatístico K-S revelou não haver diferença significativa entre os valores estimados e observados, a 5 %, para todas as profundidades analisadas. Estes resultados mostram, com efeito, que as equações (9) e (10) oferecem uma estimativa analítica bastante satisfatória para o armazenamento e fluxo de água dentro de um perfil homogêneo de solo. Isto representa uma simplificação apreciavelmente importante nas análises do comportamento da água dentro de um perfil homogêneo de solo, em relação aos problemas práticos de recarga de aquíferos, lixiviação ou retenção de fertilizantes e sais e manejos de água residuais, porque os modelos propostos exigem somente o conhecimento prévio dos dados da curva de retenção e da condutividade hidráulica do solo na profundidade de interesse.

CONCLUSÃO

Os modelos propostos (equações 9 e 10) confrontam-se satisfatoriamente, física e estatisticamente, com os valores medidos da umidade e densidade de fluxo durante o período de drenagem em todas as profundidades da Areia Marinha.

LITERATURA CITADA

- BORATTO, F. BASIC para engenheiros e cientistas. 2.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1984. 120p.
- CENTURION, J.F.; MORAES, M.H. & DELLA LIBERA, C.L.F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. R. Bras. Ci. Solo, 21:173-179, 1997.
- CHO, T.; NOMURA, Y.; YANO, T.; SHIKASHO, S. & INOUE, M. The use of a surface-type and a depth-type neutron moisture meter in studies of soil water regimes - water management in a sand dune area. Tottori, Faculty of Agriculture, Tottori University, 1977. 86p.
- JURY, W.; GARDNER, W.R. & GARDNER, W.H. Soil physics. New York, 5.ed. John Wiley & Sons, 328p. 1991.
- MENDENHALL, W. Probabilidade e estatística. Rio de Janeiro, Campus, 1985, v.2, 290p.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Res. Res., 12:513-522, 1976.
- PREVEDELLO, C.L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba, Salesward-discovery, 1996. 446p.
- SISSON, J.B.; FERGUSON, A.H. & van GENUCHTEN, M.Th. Simple method for predicting drainage from field plots. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:1147-1152, 1980.
- SOUZA PINTO, C. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo, Oficina de Textos, 2000. 247p.
- Van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.

