

UM SOFTWARE PARA CALCULAR A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO A PARTIR DE EXPERIMENTOS DE DRENAGEM INTERNA

D. DOURADO-NETO¹, K. REICHARDT², A.L. SILVA³, O.O.S. BACCHI², L.C. TIMM⁴,
J.C.M. OLIVEIRA⁵, D.R. NILSEN⁶

RESUMO: É apresentado um programa para o cálculo da condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ para métodos da literatura mais utilizados, baseados em experimentos de campo nos quais o perfil de solo é submetido à infiltração de água, seguida da drenagem interna.

PALAVRAS-CHAVE: condutividade hidráulica do solo, drenagem interna, umidade do solo.

SUMMARY: A software for the calculation of unsaturated soil hydraulic conductivity $K(\theta)$ is presented for commonly used methods found in the literature, based on field experiments in which a soil profile is submitted to water infiltration followed by internal drainage.

KEYWORDS: soil hydraulic conductivity, internal drainage, soil water content.

INTRODUÇÃO: A história da drenagem interna do solo começou com Richards, que foi o primeiro a estudar os processos físicos que determinam a perda de água de solos por drenagem (RICHARDS et al., 1956). Depois disso tivemos as contribuições pioneiras de NILSEN et al. (1964), ROSE et al. (1965) e WATSON (1966). Este último chamou o procedimento de cálculo da condutividade hidráulica como “o método do perfil instantâneo”. Depois desta década quando várias contribuições foram feitas a partir de experimentos de campo (van BAVEL et al, 1968; LA RUE et al, 1968; DAVIDSON et al, 1969), HILLEL et al. (1972) publicou um procedimento para calcular a condutividade hidráulica *in situ*. Algum tempo depois vários métodos simples foram publicados (CHONG et al, 1979; LIBARDI et al,

¹ Prof. do Departamento de Produção Vegetal – Esalq/USP. Av.: Pádua Dias, 11 Caixa Postal 9, Piracicaba – SP, CEP 13418-900. Fone: (0xx19) 3429-4284. e-mail: dourado@esalq.usp.br

² Prof. do Laboratório de Física do Solo – CENA/USP. Fone: (0xx19) 3429-4715.

³ Doutoranda em Irrigação e Drenagem, Departamento de Engenharia Rural – Esalq/USP. Fone: (0xx19) 3429-4715.

⁴ Prof. da Universidade Federal de Pelotas – UFPel.

⁵ Prof. da Escola de Engenharia de Piracicaba – EEP.

⁶ Prof. da Universidade da Califórnia, Davis, CA 95616, USA.

1980; SISSON et al, 1980). A maioria deles estava baseada na suposição de que um gradiente unitário de potencial hidráulico existia durante o processo de drenagem (REICHARDT, 1993). Vários outros também fizeram contribuições - JONES & VAGENET (1984) que compararam diversos métodos; BACCHI (1988) melhorou o método de HILLEL com cálculos analíticos das derivadas; REICHARDT et al. (2004) tornaram a equação (1) mais fácil de ser utilizada introduzindo parâmetros de regressão para obter $K(\theta)$; e HURTADO et al. (2005) deu maior atenção aos casos em que o solo drenou para condições mais secas. Para facilitar o estabelecimento das relações $K(\theta)$ pelo método do perfil instantâneo, nós apresentamos um software para fazer os cálculos, baseados em dados coletados durante experimentos de drenagem interna, utilizando os métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980), BACCHI (1988) e REICHARDT et al. (2004).

METODOLOGIA: Os dados de entrada para o software consistem do potencial mátrico da água no solo (h , cmca) e umidade do solo (θ , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) coletados durante a drenagem interna de um solo. Para obter esses dados o perfil de solo é inicialmente submetido à infiltração. Depois do equilíbrio dinâmico da infiltração o processo de drenagem interna começa em um tempo ($t = 0$) quando o suprimento de água é interrompido e a superfície do solo é coberta para evitar evaporação. Por vários dias, talvez semanas, são feitas medidas $h(z,t)$ e $\theta(z,t)$, sendo z (cm) a profundidade abaixo da superfície do solo e t (dias) o tempo de drenagem. Para essas condições experimentais a integração da equação de Richards leva à expressão utilizada para a determinação de $K(\theta)$ a qualquer profundidade L :

$$K(\theta)_L = \frac{-\int_0^L \left[\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} \right] dz}{\left[\frac{\partial H(z,t)}{\partial z} \right]_L} \quad (1)$$

onde $H = h + z$, é o potencial total da água no solo (cm c a).

Método de HILLEL et al (1972): Esses autores utilizam a equação (1) fazendo cálculos por diferenças finitas. Naquele tempo, como as ferramentas de computação não eram tão desenvolvidas como hoje, eles estimaram $\partial \theta / \partial t$ graficamente ponto por ponto a partir de gráficos de $\theta(z,t)$. Depois calculavam $(\partial \theta / \partial t) \Delta z$ para cada incremento de profundidade.

Essa metodologia pode ser usada para determinar $K(\theta)$ em qualquer profundidade L e para qualquer perfil de solo.

por ponto de gráficos $H(z,t)$. Os parâmetros da relação $K(\theta)$ foram obtidos a partir de gráficos semi-log de K versus θ para cada profundidade L . Sugeriram a relação:

$$(2)$$

Método de LIBARDI et al (1980): Estes autores usaram a equação (1) assumindo que: i) que $K(\theta)$ é da forma:

$$(3)$$

onde K_0 e θ_0 são os valores de K e θ , respectivamente; ii) que o gradiente de potencial hidráulico $\partial H / \partial z$ é unitário em todos os tempos; e iii) que a média θ^* do perfil entre 0 e L está linearmente relacionada com o valor de θ na profundidade L :

$$\theta^* = a\theta + b \quad (4)$$

Usando a última suposição,

$$\int_0^L \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) dz = \left[z \frac{\partial \theta^*}{\partial t} \right]_0^L = aL \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

a equação (1) é aproximada por:

$$-aL \frac{\partial \theta}{\partial t} = K_0 \exp[\beta(\theta - \theta_0)] \quad (6)$$

que integrada de $(t = 0, \theta = \theta_0)$ a $(t = t, \theta = \theta)$ resulta em:

$$(\theta_0 - \theta) = \frac{1}{\beta} \ln t + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\beta K_0}{aL} \right) \quad (7)$$

A constante a é obtida de uma regressão dos valores de θ^* em função de valores medidos de θ , sendo θ_0 medido diretamente no campo e os parâmetros K_0 e β são obtidos de uma regressão $(\theta_0 - \theta)$ versus $\ln t$.

Método de BACCHI (1988): Este autor melhorou o cálculo das derivadas propostas por HILLEL et al. (1972). Para $\partial \theta / \partial t$ ele simplesmente tomou a derivada da regressão de θ versus $\ln t$. Como H é geralmente relacionado linearmente a z , ele obteve $\partial H / \partial z$ a partir da derivada da regressão linear entre H e z . Nesse caso, $\partial H / \partial z$ tem o mesmo valor para todas as profundidades variando apenas no tempo. Ele sugeriu relações $K(\theta)$ como descritas pelas equações (2) e (3).

Método de REICHARDT et al. (2004): Esses autores parametrizaram a equação (1) ajustando valores medidos de $\theta(z,t)$ e $h(z,t)$ a modelos logarítmicos, para cada profundidade escolhida $z = L$:

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{b} \ln \left[1 + \frac{S_L}{\theta - \theta_0} \right] \quad (8)$$

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \left[1 + \frac{S_L}{h - h_0} \right] \quad (9)$$

$$K = K_0 \exp \left[-\frac{f}{e} \left(\theta - \theta_0 \right) \right] \quad (10)$$

onde $S_L(\text{mm})$ é o armazenamento de água para a camada 0-L. Quando o ajuste dos dados experimentais às equações (8), (9) e (10) é significativo a equação (1) foi parametrizada para:

$$K(\theta)_L = \left[\frac{\left[-d \exp \frac{1}{b} (a - \theta_0) \cdot \exp \left[-\frac{1}{b} (\theta - \theta_0) \right] \right]}{\left[e' + \frac{f'}{b} (\theta - a) \right]} \right] \quad (11)$$

onde e_1, e_2, f_1, f_2 são funções de θ e h em $(L + \Delta z)$ e $(L - \Delta z)$ e K_0 e θ_0 são constantes. $e' = 1, f' = 0$ e $\theta_0 = 0$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: A saída do software são os parâmetros: α, β, K_0 e θ_0 para os métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e BACCHI (1998). Para o método de REICHARDT et al. (2004), a saída são os parâmetros da equação (11): a, b, d, e', f' and θ_0 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BACCHI, O.O.S. Análise comparativa de métodos de determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados. Piracicaba, SP, 1988. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- CHONG, S.K.; GREEN, R.E. & AHUJA, L.R. Infiltration predication based on in situ soil water redistribution measurements: 1. Hydraulic conductivity and diffusivity determination. Water Resources Research, 15:1312-1321, 1979.
- DAVIDSON, J. M.; STONE, L. R.; NIELSEN, D. R. & LARUE, M. E. Field measurement and use of soil-water properties. Water Resources Research, 5:1312-1321, 1969.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic conductivity in situ. *Soil Sci.*, 114: 395-400, 1972.

HURTADO, A.L.B.; CICHOTA, R. & VAN LIER, Q. de J. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:301-307, 2005.

JONES, A.J. & WAGENET, R.J. In situ estimation of hydraulic conductivity using simplified methods. *Water Resources Research*, 20: 1620-1626, 1984.

LARUE, M. E.; NIELSEN, D. R. & HAGAN, R. M. Soil water flux below a ryegrass root zone. *Agronomy Journal*, 60: 625-629, 1968.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 3-7, 1980.

NIELSEN, D. R.; DAVIDSON, J. M.; BIGGAR, J. W. & MILLER, R. J. Water movement through Panoche clay loam soil. *Hilgardia*, 35: 491-506, 1964.

REICHARDT, K. Unit gradient in internal drainage experiments for the determination of soil hydraulic conductivity. *Sci. agric.*, 50: 151-153, 1993.

REICHARDT, K; TIMM, L.C.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. A parameterized equation to estimate soil hydraulic conductivity in the field. *Australian Journal of Soil Research*, 42: 283-287, 2004.

RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R. & OGATA, G. Physical processes determining water loss from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20: 310-314, 1956.

ROSE, C.W.; STERN, W.R. & DRUMMOND, J.E. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ. *Aus. J. Soil Res*, 3: 1-9, 1965.

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.

VAN BAVEL, C.H.M.; STIRK, G.B. & BRUST, K.J. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots: Interpretation of water content and pressure profiles. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, 32: 310-317, 1968.

WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. *Water Resour. Res.* 2: 709-715, 1966.