

PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE UM SOLO NÃO SATURADO UTILIZANDO-SE O PERMEÂMETRO A DISCO

Edvane Borges da Silva^{1,3}; Paulo Leonel Libardi^{2,4*}

¹Seção de Física do Solo - USP/CENA, C.P. 96 - CEP: 13400-970 - Piracicaba, SP.

²Depto. de Ciências Exatas - USP/ESALQ, C.P. 9 - CEP: 13400-970 - Piracicaba, SP.

³Bolsista FAPESP.

⁴Bolsista CNPq.

*Autor correspondente <plibard@carpa.ciagri.usp.br>

RESUMO: No presente trabalho foram determinadas as propriedades hidráulicas condutividade, (K) e sorvidade, (S). Os valores destas propriedades foram obtidos a partir de experimentos com o permeâmetro a disco ($r = 0,125$ m), nas profundidades de 0,20 m e 0,40 m, em Piracicaba, SP. O solo é classificado como Terra Roxa Estruturada latossólica, de densidade 1500 kg m^{-3} , a 0,20 m, e de 1540 kg m^{-3} , a 0,40 m, com texturas franco-argilosa e argilosa, respectivamente. Para a determinação da condutividade hidráulica, K , utilizou-se a equação de Wooding, enquanto a sorvidade, S , foi determinada a partir da regressão da porção linear do gráfico da infiltração acumulada (I) versus a raiz quadrada do tempo ($t^{1/2}$). Os valores obtidos da variação de umidade e da sorvidade refletem a alteração das condições iniciais do solo, tais como umidade inicial e estrutura superficial. Como esperado para um solo mais denso, para a profundidade de 0,40 m, os valores encontrados foram menores que os obtidos para 0,20 m. O solo, a esta profundidade, possui características estrutural e textural bem diferentes das de 0,20 m, com a sua superfície apresentando-se bastante endurecida, com grandes volumes mais adensados, formados por blocos compactados, entremeados por porções mais soltas.

Palavras-chave: condutividade hidráulica, sorvidade, permeâmetro a disco

HYDRAULIC PROPERTIES OF AN UNSATURATED SOIL USING THE DISK PERMEAMETER

ABSTRACT: Soil sorptivity (S) and unsaturated soil hydraulic conductivity (K) determinations are of fundamental importance to understand the soil water infiltration process. These properties were determined from disk permeameter ($r = 0,125$ m) experiments, performed at the depths of 0.20 m and 0.40 m of a clayey soil classified as a Rhodic Kandudalf, in Piracicaba SP, Brazil ($22^{\circ}44'$ S, $43^{\circ}33'$ W, 580 m above sea level). At the depth of 0.20 m, the average soil bulk density was 1500 kg m^{-3} and at the depth of 0.40 m, 1540 kg m^{-3} . K was determined using the Wooding equation, whereas the sorptivity S was determined from the linear portion of the curve of cumulative infiltration (I) versus square root of time ($t^{1/2}$). As expected, the values for the depth of 0.40 m were smaller than those for the depth of 0.20 m, because the soil properties (structure and texture) at the greater depth were quite different than those at 0.20 m, presenting large hardened soil aggregates intermediated by smaller softer ones, a common feature in textural horizons.

Key words: hydraulic conductivity, sorptivity, disk permeameter

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água no solo constitui um dos fatores mais importantes para o crescimento e produtividade das plantas, nativas ou cultivadas. Sendo este o principal reservatório de água para as plantas, é evidente que a determinação das suas propriedades hidráulicas - que condicionam a dinâmica da própria água - é essencial para descrever e compreender os processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera, tornando-se possível identificar as relações entre as práticas de manejo da água e a produtividade das culturas.

Na literatura, encontram-se descritos vários métodos e técnicas de medidas, desenvolvidos para quantificar as propriedades condutividade hidráulica (K) e sorvidade (S) (Clothier & White, 1981; Chong & Green, 1983; White & Perroux, 1989; Ankeny et al., 1988; White et al., 1992). A sorvidade é um parâmetro hidrológico

primeiramente introduzido por Philip (1957), para descrever a capacidade de um solo homogêneo absorver água na ausência dos efeitos gravitacionais. A sua determinação *in situ* foi primeiramente relatada por Talsman (1969). A determinação de S é realizada no estágio inicial da infiltração, justamente quando a capilaridade é o efeito dominante. Entretanto, perturbações na superfície do solo, podem afetar os valores de K e proporcionar resultados que não condizem com o solo estudado. Desta forma, é claramente desejável que os métodos e as técnicas utilizadas para quantificar essas propriedades não provoquem perturbações adicionais no próprio solo e que forneçam valores representativos, de precisão e exatidão adequados.

Visando suprir estas exigências, pesquisadores desenvolveram vários aparelhos e técnicas de medidas. Dentre tais aparelhos tem-se o permeâmetro a disco (Clothier & White, 1981; Perroux & White, 1988) cujo uso

vem ganhando popularidade na determinação das propriedades hidráulicas, devido a simplicidade e rapidez com que as medidas podem ser realizadas e por não provocar grandes distúrbios na superfície do solo (White & Sully, 1987; Ankeny et al., 1988; Smettem & Clothier, 1989; White et al., 1992).

O objetivo do presente trabalho foi a determinação das propriedades hidráulicas (K e S) para duas profundidades (0,20 m e 0,40 m) de um solo não saturado, no campo, a partir de testes realizados utilizando-se o permeâmetro a disco.

TEORIA

Existem várias alternativas para se medir e avaliar as propriedades hidráulicas usando os permeômetros a disco. Numa delas, método de White et al. (1992), apenas um disco é utilizado, para as medidas de infiltração. Neste método, a sorvidade é determinada no estágio inicial da infiltração, justamente quando a capilaridade é o efeito dominante e o efeito da gravidade pode ser desprezado. Nesta fase, tem-se que a infiltração acumulada $I(t)$ será proporcional à raiz quadrada do tempo e será dada por (Philip, 1957):

$$I = S t^{1/2} \quad (1)$$

onde I é a infiltração acumulada (volume infiltrado por unidade de área) e t é o tempo. Para longos períodos de infiltração, o fluxo aproxima-se de um valor estacionário dado por (Wooding, 1968):

$$q_{\infty} = K + \frac{4\phi}{\pi} \frac{1}{r} \quad (2)$$

onde

$$\phi = \int_{\psi_n}^{\psi_0} K(\theta) d\psi = \int_{\theta_n}^{\theta_0} D(\theta) d\theta \quad (3)$$

é a transformação de Kirchoff, ou o fluxo do potencial mátrico (Gardner, citado por Thony et al., 1991). Nestas equações, K é a condutividade hidráulica correspondente ao potencial ψ ; r é o raio do disco permeâmetro; e θ_n e θ_0 são as umidades volumétricas inicial e final, respectivamente. Assumindo-se a expressão exponencial para $D(\theta)$, relacionada com a sorvidade S por (Reichardt et al., 1972; Brutsaert, 1979; White, 1987)

$$D(\theta) = \frac{\gamma S^2}{(\theta_0 - \theta_n)^2} \exp\left[\frac{\beta(\theta - \theta_n)}{(\theta_0 - \theta_n)}\right], \quad (4)$$

substituindo a eq. (4) na eq. (3) e integrando-se a equação resultante obtém-se:

$$\phi = \frac{bS^2}{\Delta\theta} \quad (5)$$

Nesta equação $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_n$ e

$$b = \gamma \left[\frac{\exp\beta - 1}{\beta} \right] \quad (6)$$

onde γ é um coeficiente dependente apenas de β .

Segundo White & Sully (1987), o parâmetro b apresenta muitas dificuldades de obtenção no campo e, por isso, optou-se por assumir, como fizeram esses autores, que ele tenha um valor constante de aproximadamente 0,55, independentemente do solo e da faixa de umidade. Dessa forma, utilizando-se S obtido através da eq. (1) e tendo-se medidos os valores de θ_0 e θ_n , é possível determinar-se ϕ (eq. 5). Os valores de ϕ obtidos foram utilizados na eq. (2) para determinar K a partir da medida de q_{∞} .

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, apresentamos os resultados obtidos nos experimentos, utilizando-se um permeâmetro a disco, para a determinação de K e de S de um solo classificado como Terra Roxa Estruturada latossólica, localizado na área experimental do Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP, em Piracicaba - SP. Para os experimentos, três parcelas (E1, E2, E3) foram abertas em duas profundidades (0,20 m e 0,40 m) do solo. O solo é classificado como terra roxa estruturada latossólica, de densidade 1410 kg m^{-3} e 1500 kg m^{-3} , nas profundidades de 0,20 e 0,40 m, com texturas franco argilosa e argilosa, respectivamente. A 0,40 m, o solo possui características estrutural e textural bem diferente da de 0,20 m, com a sua superfície apresentando-se bastante endurecida, com grandes volumes mais adensados, formados por blocos compactados, entremeados por porções mais soltas. Foi utilizado um permeâmetro a disco de raio $r = 0,125 \text{ m}$, ajustado para fornecer água a um potencial mátrico de $-0,10 \text{ m}$ de coluna de água. Na Figura 1 é mostrado um esquema do permeâmetro a disco, onde B_a é a base do permeâmetro; M é uma membrana (mantida levemente tensa por um bracelete de borracha B_r) constituída de um tecido de Nylon projetado com dimensões de poros para proporcionar condutividade hidráulica adaptada à pressão controlada; R_A é o reservatório de alimentação, fechado

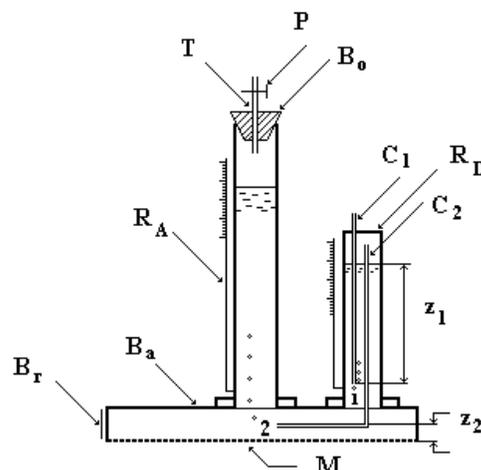


Figura 1 - Esquema do permeâmetro de tensão utilizado.

em seu topo por uma rolha de borracha B_0 , na qual está acoplado um pequeno tubo munido de um duto flexível e de uma pinça de Mohr (P); R_D é o reservatório de depressurização, por onde passam os tubos C_1 , que permite a passagem de ar, e C_2 , que realiza a comunicação entre o reservatório de depressurização e a base. A altura z_1 da coluna de água sobre a extremidade 1 do tubo C_1 é usada para selecionar e controlar a pressão de fornecimento de água, ψ , a qual é determinada pela diferença. z_2 (o desnível entre a extremidade 2 do tubo C_2 e o plano da membrana) e a altura, z_1 (cm) da coluna de água sobre a extremidade 1 do tubo C_1 (Figura 1), de tal forma que

$$\psi = z_2 - z_1 \quad (7)$$

A altura z_2 , no equipamento utilizado, é 1 cm.

A preparação da superfície consistiu na remoção do mato, nivelamento com nível de bolha, retirada de raízes, utilizando-se um instrumento cortante, e na aplicação, na área abrangida pelo disco, de uma areia fina de contato, cuja espessura foi variável, de acordo como a irregularidade apresentada por cada área amostrada. As umidades inicial e final (θ_n e θ_0 , respectivamente) foram determinadas utilizando-se o método gravimétrico. O método utilizado para a determinação das propriedades hidráulicas, consistiu em monitorar a infiltração da água proveniente do permeâmetro até que o estado estacionário fosse alcançado. Em cada parcela estudada, foi realizado um total de 4 repetições. Uma vez alcançado o estado estacionário, o permeâmetro foi retirado da superfície do solo, a areia fina rapidamente afastada para a imediata coleta das amostras de solo para a determinação das umidades finais.

Para a determinação das propriedades hidráulicas, utilizou-se o método de White et al. (1992), o qual considera a Eq. (1) para a determinação da sortividade, S. Os valores obtidos de S, foram, conseqüentemente substituídos na Eq. (2) para a determinação de K.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os gráficos da infiltração acumulada em função do tempo, para as profundidades de 0,20 m e 0,40 m, respectivamente. A separação entre as áreas apresentadas nas figuras foi realizada visualmente, segundo sugestão dada por Cook & Broeren (1994), os quais se basearam nas observações de campo para determinar a aproximação do estado estacionário da infiltração. A região I indica o tempo onde o estado estacionário ainda não foi alcançado e a região II, quando este estado foi alcançado. A determinação dos valores dos fluxos (TABELA 1) foi feita a partir da regressão da porção final (estado estacionário) da curva I versus t obtida a partir das leituras com o permeâmetro (Figuras 2 e 3). Os valores da correlação R^2 , muito próximos de 1, mostram um bom ajuste da curva de regressão aos pontos experimentais.

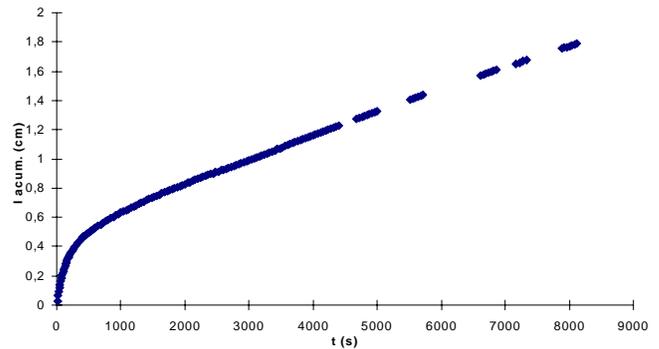


Figura 2 - Infiltração acumulada (I) versus o tempo para uma das 4 repetições com o disco permeâmetro ($r = 0,125$ m e $\psi = -0,10$ m), para a parcela E1, a 0,20 m de profundidade.

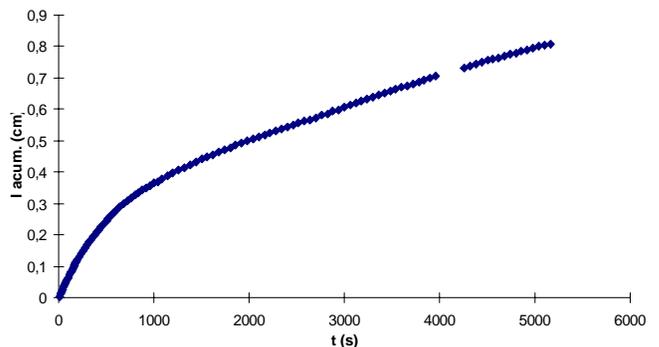


Figura 3 - Infiltração acumulada (I) versus o tempo para uma das 4 repetições com o disco permeâmetro ($r = 0,125$ m e $\psi = -0,10$ m), para a parcela E1 a 0,40 m de profundidade.

Os valores da sorvidade (ver TABELA 1) foram obtidos a partir da inclinação da curva I versus $t^{1/2}$ (Eq. 1), no estágio inicial da infiltração, como mostra a Figura 4. Também aqui, os valores da correlação R^2 , muito próximos de 1, mostram um bom ajuste da curva de regressão aos pontos experimentais. Para obtenção dos valores de K, utilizou-se a Eq. (2). Na determinação dos valores da sorvidade, considerou-se o gráfico de I versus $t^{1/2}$ (Figuras 4 e 5) como contendo três regiões distintas, (Cook & Broeren, 1994); a primeira, região I, indica absorção no material de capeamento, e, portanto, deve ser desconsiderada por não representar a infiltração no solo; a segunda região, II, representa o momento em que a capilaridade domina o fluxo. É justamente nessa região, em que a sorvidade é calculada (inclinação da reta). A região III, representa o tempo em que a geometria da fonte domina o fluxo. Esta separação foi realizada de forma visual, segundo sugestão de Cook & Broeren, (1994), mas baseada no que se observou no campo, durante a evolução dos experimentos. Smettem & Clothier (1989), em seu trabalho, consideraram que o tempo durante o qual a infiltração observada refletia a infiltração devido ao material de capeamento, seria de 30 segundos. Porém, em nossos experimentos, observamos que este tempo foi bem maior, chegando a cerca de 100 segundos a 0,20 m, e a cerca de 400 segundos nos experimentos a 0,40. Isto,

TABELA 1 - Valores do fluxo estacionário (q_{∞}), da variação de umidade ($\Delta\theta$), da sorvidade (S) e da condutividade hidráulica (K) para os experimentos com o permeâmetro a disco ($r = 0,125$ cm e $\psi = -0,10$ m) realizados no posto meteorológico da ESALQ no primeiro semestre de 98. Média de 4 repetições.

Parcela	$q_{\infty} \cdot 10^{-6}$ (m s ⁻¹)	$\Delta\theta$ (m ⁻³ m ⁻³)	S.10 ⁻⁴ (m s ^{-1/2})	K.10 ⁻⁷ (m s ⁻¹)
0,20 m				
E1	2,650 ± 0,050	0,168 ± 0,019	2,650 ± 0,757	5,120 ± 3,822
E2	1,750 ± 0,500	0,185 ± 0,025	1,560 ± 0,486	9,190 ± 2,404
E3	1,500 ± 0,577	0,199 ± 0,045	1,490 ± 0,291	6,780 ± 3,646
0,40 m				
E1	0,825 ± 0,206	0,178 ± 0,039	1,010 ± 0,214	4,975 ± 1,457
E2	0,950 ± 0,577	0,161 ± 0,074	1,080 ± 0,287	4,710 ± 1,727
E3	0,550 ± 0,332	0,183 ± 0,062	0,605 ± 0,303	4,210 ± 2,414

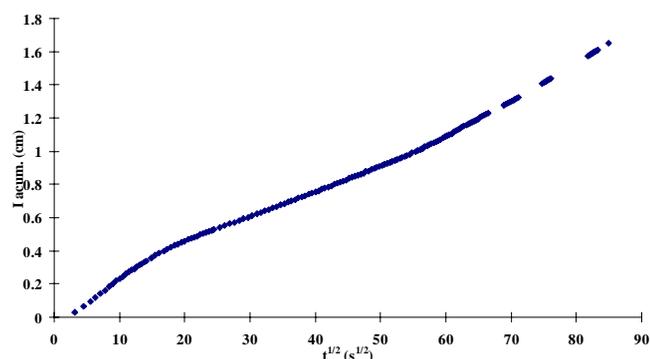


Figura 4 - Infiltração acumulada (I) versus a raiz quadrada do tempo ($t^{1/2}$) para uma das 4 repetições com o disco permeâmetro ($r = 0,125$ m e $\psi = -0,10$ m), na parcela E1 a 0,20 m de profundidade. Determinação da sorvidade, a partir da inclinação da reta compreendida na região II.

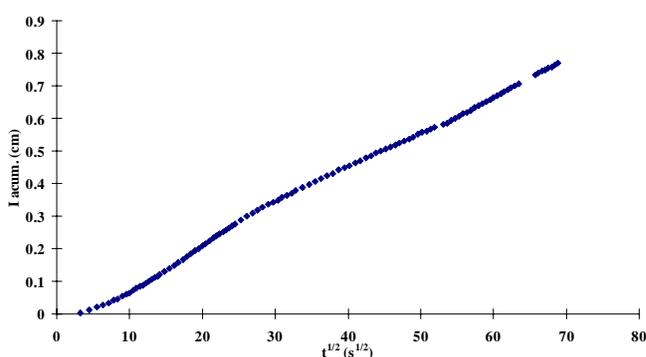


Figura 5 - Infiltração acumulada (I) versus a raiz quadrada do tempo ($t^{1/2}$) para uma das 4 repetições com o disco permeâmetro ($r = 0,125$ m e $\psi = -0,10$ m), para a parcela E1 a 0,40 m de profundidade. Determinação da sorvidade, a partir da inclinação da reta compreendida na região II.

provavelmente, se deva à uma menor capacidade de absorção do solo estudado, no estágio inicial da infiltração.

As realizações dos experimentos variaram de 2,05 h a 2,67 h, para a profundidade de 0,20 m, e de 1,28 h a 2,87 h, para a profundidade de 0,40 m. Os experimentos a 0,40 m, foram, em média, bem mais demorados, uma vez que, a esta profundidade, o solo apresenta uma maior densidade (1549 kg m⁻³). Adicionalmente, o solo apresentou-se bastante irregular na sua formação, com a presença de grandes volumes mais adensados, formados por blocos compactados, entremeados por porções mais soltas. Na TABELA 1 são apresentados os valores obtidos para as propriedades hidráulicas.

Os valores do fluxo e da sorvidade, mostrados na TABELA 1, refletem a alteração das condições iniciais de umidade e estrutura superficial, pois os trabalhos realizados na parcela E1, a 0,20 m, aconteceram pouco antes que caíssem chuvas na região, ao contrário dos experimentos realizados nas parcelas E2 e E3 que foram executados em condições de solo bem mais úmido ($\theta_n = 0,240$ m⁻³ m⁻³), justamente no período em que ocorreram chuvas freqüentes na região. Os valores da

condutividade hidráulica, apresentaram uma pequena variação, não estatisticamente significativa, segundo teste da análise de variância de Tukey, entre as parcelas, que pode ser explicada pela própria variabilidade encontrada em solos no campo.

Como esperado, os valores das propriedades estudadas, obtidos para a profundidade de 0,40 m, foram menores que os obtidos para 0,20 m, devido às características, já citadas acima, em sua estrutura e umidade inicial. A esta profundidade, o solo tem uma característica bem diferente da de 0,20 m e esta estrutura mais endurecida, média e grande bloco subangular forte; com cerosidade forte e abundante (Costa & Libardi, 1999), pode ter contribuído para que os experimentos a essa profundidade fossem bem mais demorados, apesar da observação de um menor volume de água infiltrada. Antonino et al. (1995), no seu trabalho, onde foram estudadas três profundidades de um solo essencialmente arenoso, também observaram a diminuição nos valores das propriedades hidráulicas quando considerando as maiores profundidades. Neste trabalho, os autores também utilizaram o permeâmetro a disco.

CONCLUSÕES

Foi comprovada a eficácia do permeâmetro a disco na determinação das propriedades hidráulicas. Foi possível detectar variações nos valores do fluxo e da sorvidade, quando variaram a profundidade e as condições iniciais da superfície estudada, bem como detectar variações decorrentes da própria estrutura do solo, quando este se apresentou menos ou mais compactado, como ficou claro nos experimentos a 0,40 m.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANKENY, M.D.; KASPAR, T.C.; HORTON, R. Design for an automated tension infiltrometer. **Soil Science Society American Journal**, v.52, p.893-869, 1988.
- ANTONINO, A.C.D.; DALL'OLIO, A.; BORGES, E.; AUDRYE, P.; CARNEIRO, C.J.G. Utilização de permeâmetros a disco na determinação da condutividade hidráulica e sorvidade do solo. In: SIMPÓSIO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., Recife, 1995. **Anais**. Recife: ABRH, 1995. p.103-108.
- BRUTSAERT, W. Universal constants for scaling the exponential soil water diffusivity. **Water Resources Research**, v.15, p.481-483, 1979.
- CHONG, S.K.; GREEN, R.E. Sorptivity measurement and its application. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN INFILTRATION, Chicago, 1983. **Advances in infiltration**; proceedings. Chicago: ASAE, 1983. p.82-91.
- CLOTHIER, B.E.; WHITE, I.; HAMILTON, G.J. Constant-rate rainfall infiltration: Field experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.245-249, 1981.
- COOK, F.J.; BROEREN, A. Six methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disc permeameters. **Soil Science**, v.157, p.2-11, 1994.
- COSTA, A.C.S. da.; LIBARDI, P.L. Caracterização físico-hídrica de um perfil de terra roxa estruturada latossólica pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v.23, p.669-677, 1999.
- GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v.85, p.222-232, 1958.
- PHILIP, J.R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, v.84, p.257-265, 1957.
- PERROUX, K.M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.1205-1215, 1988.
- REICHARDT, K.D.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Scaling of infiltration into homogeneous soils. **Soil Science American Proceedings**, v.36, p.240-245, 1972.
- SMETTEM, K. R.J.; CLOTHIER, B.E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. **Journal of Soil Science**, v.40, p.563-568, 1989.
- TALSMAN, T. In situ measurements of sorptivity. **Australian Journal of Soil Resources**, v.7, p.269-279, 1969.
- THONY, J.L.; VACHAUD, G.; CLOTHIER, B.E.; ANGULO-JARAMILLO, R. Field measurement of the hydraulic properties of soil. **Soil Technology**, v.4, p.111-123, 1991.
- WHITE, I.; SULLY, M.J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v.23, p.1514-1522, 1987.
- WHITE, I. Comments on 'Sorptivity approximations' by Kutilek and Valentova. **Transport Porous Media**, v.2, p.317-322, 1987.
- WHITE, I.; PERROUX, K.M. Estimation of unsaturated hydraulic conductivity for field sorptivity measurements. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p.324-329, 1989.
- WHITE, I.; SULLY, M.J.; PERROUX, K.M. Measurement of surface-soil hydraulic properties: Disc Permeameters, tension infiltrometers and other techniques. In: TOPP, G. C. (Ed.) **Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice**. Madison: SSSA, 1992. p.69-104. (Special Publication, 30)
- WOODING, R.A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resources Research**, v.4, p.1259-1273, 1968.

Recebido em 08.10.99