

## Propriedades hidráulicas do solo determinadas em experimentos de evaporação utilizando tensiômetros de polímeros<sup>(1)</sup>.

Quirijn de Jong van Lier<sup>(2)</sup>; Angelica Durigon<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Trabalho executado com recursos da FAPESP

<sup>(2)</sup> Professor, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP; Piracicaba, SP; qdjvlier@usp.br.

<sup>(3)</sup> Pesquisadora de pós-doutorado da Fapesp, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP; Piracicaba, SP; angelica.durigon@usp.br.

**RESUMO:** O conhecimento das propriedades de retenção e condução da água no solo é importante para a previsão e modelagem agro-ecológica, hidrológica e meteorológica. Entre os métodos para a determinação da retenção, o método laboratorial com funil ou câmara de pressão com placa porosa é o mais comum. Para a condutividade hidráulica, dispõe-se de métodos de campo e de laboratório e nesse caso a dificuldade metodológica aumenta conforme o solo se torna mais seco pela lentidão do processo. O método laboratorial de evaporação é uma alternativa viável para a determinação de ambas a retenção e a condutividade hidráulica, sendo sua aplicação normalmente limitada à faixa de funcionamento do tensiômetro, no solo relativamente úmido. O desenvolvimento de um equipamento novo, o tensiômetro de polímero, permite a medição direta da tensão da água no solo até o ponto de murcha permanente, à tensão de 150 m. Objetivando a consolidação e padronização de um método laboratorial para a determinação dessas propriedades hidráulicas do solo numa faixa ampla de potenciais/teores de água, determinaram-se as propriedades de retenção e condução de um solo num experimento de evaporação com a utilização desses tensiômetros, discutindo-se a metodologia.

**Termos de indexação:** Condutividade hidráulica; Método de Wind

### INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades hidráulicas (retenção e condução da água) no solo é importante para a modelagem na hidrologia, na meteorologia e na produção vegetal. Sem o conhecimento dessas propriedades, previsões dos fluxos de água no solo e da transpiração vegetal ficam prejudicadas (Šimůnek et al., 1998; Schneider et al., 2006).

Diversos métodos estão disponíveis para determinar as propriedades hidráulicas do solo (Dane & Topp, 2002). A retenção da água é determinada com relativa frequência em amostras de solo no laboratório na faixa de interesse agrônomo, entre os potenciais matriciais (h) de 0 (solo saturado) e -150 m (ponto de murcha

permanente), utilizando-se funis de placa porosa e/ou câmaras de pressão de Richards. Determinações no campo, medindo-se simultaneamente a tensão da água por tensiometria e seu teor de água por TDR, sonda de nêutrons ou outro método, são limitadas geralmente à faixa de funcionamento do tensiômetro, entre os potenciais de 0 e -8 m.

Mais escassas são as determinações da condutividade hidráulica do solo, principalmente do solo não-saturado. Determinações no campo pelo método do "perfil instantâneo" ou por métodos de infiltrometria são feitas mas, além de trabalhosos, para representar bem uma área carecem de muitas repetições (Hurtado et al., 2005) e se limitam à faixa relativamente úmida, seja pelo instrumento de medição utilizado, seja pela morosidade do processo de drenagem interna do solo quando ele se torna mais seco (Reichardt, 1988).

Um método alternativo para a determinação das propriedades hidráulicas do solo é o "método de evaporação", aplicado em laboratório a colunas de solo (Wind, 1968; Schindler, 1980; Wendroth et al., 1993; Arya, 2002). Por esse método, amostras de solo deformadas ou indeformadas, acondicionadas em anéis cilíndricos são saturadas com água, fechadas no seu lado inferior, permitindo-se a evaporação do lado superior. Instalam-se tensiômetros no anel, lateralmente, para a medição do perfil de potencial no anel durante o processo da secagem do solo por evaporação. A distribuição não-linear dos perfis de conteúdo de água e potencial matricial durante os experimentos de evaporação define o número ótimo de tensiômetros a ser utilizado nos mesmos, bem como as profundidades de instalação (Peters & Durner, 2008). O método evoluiu quando Schindler et al. (1985) propôs modificações ao método original de Wind (1968), medindo a massa total da amostra durante todo o experimento e o potencial matricial em somente duas profundidades. Com isso, foi possível determinar as funções de retenção de água e de condutividade hidráulica simultaneamente.

Para as condições quase-saturadas, por se tratar de amostras deformadas, o método não é uma alternativa viável aos métodos com estrutura conservada. Para o solo mais seco (a partir de

potenciais matriciais da ordem de -1 m), no entanto, a porosidade estrutural perde sua importância e o método é particularmente interessante pela sua relativa simplicidade. Comparando-o com os experimentos de drenagem (“perfil instantâneo”), o método é muito menos trabalhoso e permite observações no solo mais seco, onde essas observações no solo sob drenagem livre são geralmente inviáveis (Reichardt, 1988; De Jong van Lier & Libardi, 1999; Hurtado et al., 2005).

Uma das limitações do método de evaporação advém do uso de tensiômetros convencionais, restringindo as determinações à faixa de potenciais matriciais entre 0 e -8 m. No método em discussão, pelo fato de se adequar a observações no solo mais seco, essa limitação é especialmente prejudicial. A indisponibilidade da determinação da condutividade para as condições mais secas do solo leva frequentemente à utilização de equações empíricas que permitem a extrapolação.

Um novo tipo de tensiômetro, o tensiômetro de polímero, foi recentemente desenvolvido (Bakker et al., 2007; van der Ploeg et al., 2008). O tensiômetro de polímero é capaz de medir a tensão da água retida no solo desde a saturação ( $h = 0$  m) até  $h$  em torno de -160 m, além do ponto de murcha permanente considerado normalmente como  $h = -150$  m. A utilização de tensiômetros de polímero num esquema experimental análogo ao proposto por Schindler et al. (1985) permitiria, portanto, as medidas simultâneas das propriedades hidráulicas do solo na faixa completa de conteúdos de água de interesse em estudos ambientais e agrônômicos. Trabalhos piloto nesse sentido foram realizados recentemente, com sucesso, por Durigon et al. (2011) e Durigon & De Jong van Lier (2011).

Objetivando o aperfeiçoamento do método, o presente trabalho apresenta considerações metodológicas para a determinação da condutividade hidráulica do solo não saturada pelo método de evaporação (Schindler et al., 1985) com o uso de tensiômetros de polímeros. Os resultados das medições são inéditos no seu gênero, pois até o presente momento a medição direta da tensão da água no solo se limitava à faixa mais úmida.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Solo

Coletou-se material deformado de resultados da determinação das propriedades hidráulicas de um Latossolo vermelho escuro da Estação Experimental do IAC-APTA, Piracicaba (SP). O material coletado foi seco ao ar e peneirado (peneira de malha de 2 mm).

### Experimento laboratorial

A montagem laboratorial consistiu de três conjuntos compostos de uma balança de precisão (capacidade 8500 g, resolução 0,1 g), um anel torneado para acomodar o material de solo, três tensiômetros de polímero inseridos em três profundidades distintas no solo no anel (de cima para baixo: T1, T2 e T3) e conectados aos respectivos dataloggers acomodados num suporte manufaturado de madeira, e uma ventoinha de CPU para uniformizar o fluxo de ar ao redor do conjunto. A Figura 1 mostra uma foto do experimento montado. A balança de cada um dos conjuntos encontrava-se conectada à porta serial de um microcomputador que aparece do lado direito da primeira foto.

Para salvar, de tempo em tempo, os pesos registrados pelas balanças, foi desenvolvido um software específico. O conjunto microcomputador–balanças foi ligado a um equipamento “no-break” para garantir a continuidade das medições no caso de faltas no fornecimento de energia elétrica.

Para cada camada de cada solo foram realizados seis testes (repetições) de evaporação. Dispondo de três conjuntos balança-anel-tensiômetros, as seis repetições se realizaram em duas vezes de três repetições cada.

### Processamento dos dados

Como a resolução das balanças é de 0,1 g, e observações foram registradas a cada 10 minutos, os valores da variação de massa em cada intervalo de tempo passaram por um processo chamado “smoothing” (suavização). Um método indicado para a suavização, quando os dados apresentam uma tendência, é o método de Holt (1957) que calcula um novo valor  $y'_k$  em função do valor anterior  $y_{k-1}$  segundo

$$y'_k = ay_k + (1-a)(y'_{k-1} + t_{k-1})$$

onde

$$t_k = b(y'_k - y'_{k-1}) + (1-b)t_{k-1}$$

e  $a$  é a constante de suavização de nível e  $b$  é a constante de suavização de tendência. Utilizou-se  $a=0.03$  e  $b=0.1$  no presente estudo.

A seguir estimaram-se os parâmetros da curva de retenção (equação de Van Genuchten, 1980) comparando-se o teor de água médio das 6 repetições, ao longo do tempo, calculado pelos teores de água estimados com a equação, em função dos potenciais matriciais observados, e o

teor de água médio observado a partir da massa do conjunto experimental.

De posse dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) estimou-se a condutividade hidráulica entre os tensiômetros T1 e T2 e entre T2 e T3, simultaneamente para as 6 repetições, considerando-se que a densidade de fluxo de água correspondia à variação da armazenagem do solo abaixo da respectiva posição, dividida pelo intervalo de tempo. A esses valores ajustou-se a equação de condutividade relativa de Van Genuchten (1980).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 observam-se os teores de água observado e estimado após ajuste da curva de retenção. Os parâmetros obtidos da Equação de Van Genuchten (1980) foram  $\alpha = 0,5356 \text{ m}^{-1}$ ,  $n = 1,204$ ,  $\theta_r = 0,099 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $\theta_s = 0,291 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Observa-se um bom ajuste dos teores de água.

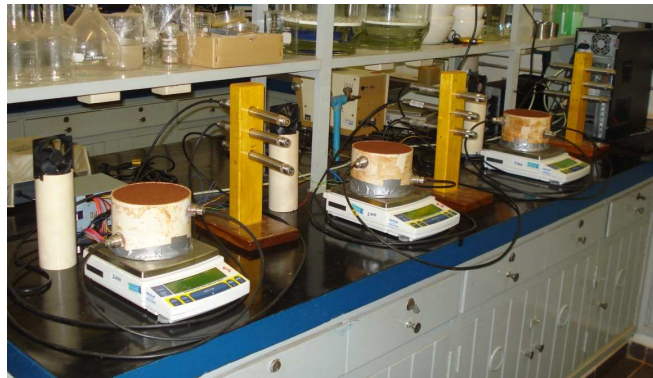
Os valores de condutividade hidráulica em função do teor de água estão na Figura 3, juntos com a linha que representa a equação de Van Genuchten (1980). Os parâmetros de ajuste obtidos para essa equação foram  $\lambda = -6,39$  e  $K_s = 0,0011 \text{ m d}^{-1}$ .

## CONCLUSÕES

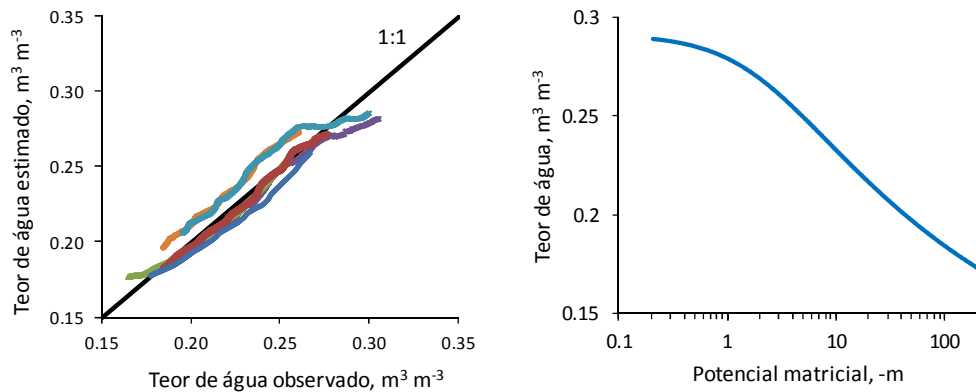
O método utilizado permitiu determinações da condutividade hidráulica do solo não saturado num intervalo amplo de teores de água correspondente à faixa de potenciais entre -1 e -100 metros.

## REFERÊNCIAS

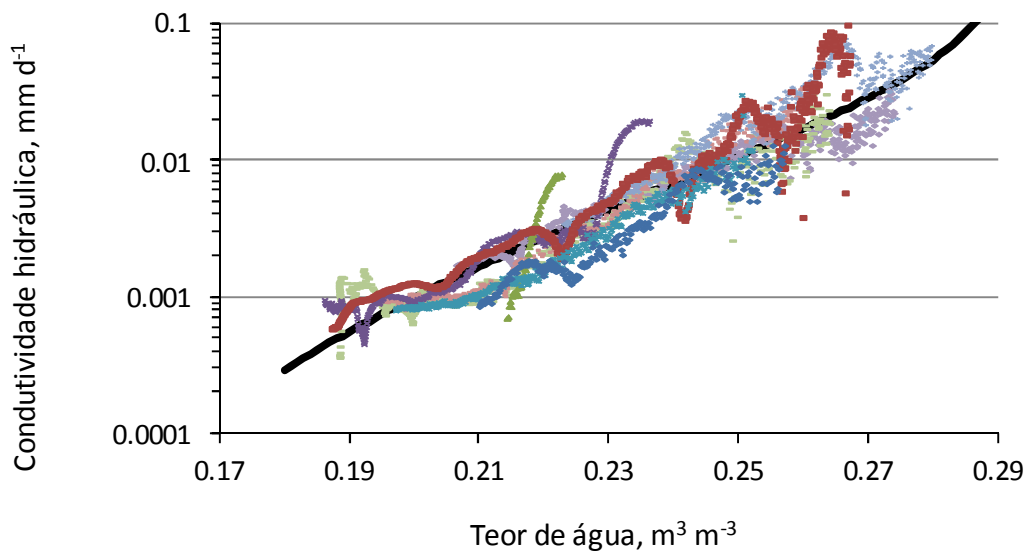
- ARYA, L.M. Wind and hot-air methods. In: Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods*, Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA (2002). p. 916-920.
- BAKKER, G.; VAN DER PLOEG, M.J.; DE ROOIJ, G.H.; HOOGENDAM, C.W.; GOOREN, H.P.A.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K. & KRUIDHOF, H. New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down to the wilting point. *Vadose Zone Journal*, 6: 196-202, 2007.
- DANE, J.H. & TOPP, G.C. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 4, Physical Methods*. SSSA Book Series No 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, 2002. 1692 pp.
- DE JONG VAN LIER, Q. & LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23:1005-1014, 1999.
- DURIGON, A. & DE JONG VAN LIER, Q. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímero em experimentos de evaporação. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1271-1276, 2011.
- DURIGON, A.; GOOREN, H.P.A., DE JONG VAN LIER, Q. & METSELAAR, K. Measuring hydraulic conductivity to wilting point using polymer tensiometers in an evaporation experiment. *Vadose Zone J.* 10:741-746, 2011.
- HOLT, C.C. Forecasting Trends and Seasonal by Exponentially Weighted Averages. *International Journal of Forecasting* 20: 5-10, 1957.
- PETERS, A. & DURNER, W. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356: 147-162, 2008.
- HURTADO, A.L.O.B.; CICHOTA, R. & DE JONG VAN LIER, Q. 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.
- REICHARDT, K. Aspects of soils physics in Brazil. *Soil Technology* 1:93-94, 1988.
- SCHINDLER, U. Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk. Berlin*, 24:1-7, 1980.
- SCHINDLER, U.; BOHNE, K. & SAUERBREY, R. Comparison of different measuring and calculating methods to quantify the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 148: 607-617, 1985.
- SCHNEIDER, K.; IPPISCH, O. & ROTH, D.K. Novel evaporation experiment to determine soil hydraulic properties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10: 817-827, 2006.
- ŠIMŮNEK, J.; WENDROTH, O. & VAN GENUCHTEN, M.T. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 894-905, 1998.
- VAN DER PLOEG, M.J.; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G. & DE ROOIJ, G.H. Matric potentials measurements by polymer tensiometers in cropped lysimeters under water-stressed conditions. *Vadose Zone Journal*, 7: 1048-1054, 2008.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-897, 1980.
- WENDROTH, O.; EHLERS, W.; HOPMANS, J.W.; KLAGE, H.; HALBERTSMA, J. & WÖSTEN, J.H.M. Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 1436-1443, 1993.
- WIND, G.P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: Rijtema, P.E. & Wassink, H. (Eds.), *Water in the Unsaturated Zone*, vol. 1. Proceedings of the Wageningen Symposium, 19-23 June 1968. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. (IASH), Gentbrugge, The Netherlands and UNESCO, Paris.



**Figura 1** – As três balanças carregadas com anel com solo, cada um munido com três tensiômetros. À direita o computador que registra a massa do conjunto automaticamente a cada 10 minutos.



**Figura 2** – Teor de água observado e estimado (lado esquerdo) após ajuste da curva de retenção da água no solo (lado direito). As curvas coloridas representam as 6 repetições.



**Figura 3** – Curva de condutividade hidráulica (pontos coloridos são valores observados; a linha preta representa a equação de Van Genuchten – Mualem ajustada).