



# XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo

Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas  
31 de julho à 05 de agosto - Center Convention - Uberlândia/Minas Gerais

## AVALIAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE CONSIDERANDO A EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN E UMIDADES RESIDUAIS NEGATIVAS

**Marta Vasconcelos Ottoni<sup>(1)</sup>; Theophilo Benedicto Ottoni Filho<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Pesquisadora; Departamento de Hidrologia; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Avenida Pasteur, 404, Urca, CEP: 22290-240, Rio de Janeiro (RJ); marta.ottoni@cprm.gov.br; <sup>(2)</sup> Professor; Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente; Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia, Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Bloco D, sala 202, CEP: 21.941-909, Rio de Janeiro (RJ)

**Resumo** – A equação de van Genuchten possui cinco parâmetros ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $n$ ,  $m$  e  $\alpha$ ). Para reduzir esse número, assume-se frequentemente a relação  $m=1-1/n$ . Uma outra possibilidade é atribuir aos parâmetros  $\theta_s$  e  $\theta_r$  um significado físico. Um dos problemas dessa proposta, no que tange à umidade residual  $\theta_r$ , é que esse termo ainda carece de sentido conceitual mais claro, sendo prematuro aceitá-lo como um parâmetro físico, mas uma constante empírica a ser estimada, podendo assumir valores negativos. Apesar disto, muitos trabalhos continuam a utilizar o  $\theta_r$ , mesmo que parcialmente, com conotação física, uma vez que o restringem para valores positivos. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar se curvas de retenção de umidade (CRUs) parametrizadas para  $\theta_r < 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  apresentam melhor performance de ajuste do as correspondentes parametrizadas para  $\theta_r \geq 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Para tanto, foram selecionadas 473 CRUs na faixa de 0 a 15.000cm de sucção e utilizados os programas RETC e uma alteração deste, que considera  $\theta_r < 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , para o cálculo dos parâmetros  $m$ ,  $\alpha$  e  $\theta_r$ . Em ambos os programas, assumiu-se  $\theta_s$  como um parâmetro conhecido e  $m=1-1/n$ . Os resultados mostraram que as estimativas das CRUs quando  $\theta_r < 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  apresentaram frequentemente melhoria substancial de acurácia do que quando  $\theta_r \geq 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , reforçando a conveniência de se considerar o  $\theta_r$  como uma variável empírica, sem significação física. Sugere-se o valor de  $-0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  como limite mínimo de umidade residual, sem prejuízo marcante na estimativa da CRU. Caso se adote  $\theta_r$  negativo, recomenda-se que a curva estimada não seja extrapolada para sucções maiores do que a máxima efetivamente medida.

**Palavras-Chave:** curva característica, modelo de van Genuchten, RETC

### INTRODUÇÃO

Um dos modelos mais usados para a descrição matemática da relação funcional entre teor e sucção de água no solo, a chamada curva de retenção de umidade, é o modelo de van Genuchten (1980), neste trabalho designado como eq. VG:

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

, sendo  $\theta$  e  $\theta_s$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), a umidade e a umidade de saturação, respectivamente,  $h$  (cm), a sucção (com valores positivos),  $\theta_r$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), a umidade residual, e  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $m$  e  $n$  (adimensionais) parâmetros empíricos do modelo.

Os cinco parâmetros dessa equação podem ser estimados pelo método dos mínimos quadrados utilizando recursos computacionais (van Genuchten et al., 1991; Dourado Neto et al., 2000), requerendo nesse caso, em princípio, a disponibilidade de pelo menos cinco pontos medidos da curva de retenção, o que nem sempre é possível, principalmente quando se necessitam medições na faixa mais seca dessa curva. Nessas situações, van Genuchten et al. (1991) sugerem o uso das restrições  $m=1-1/n$  ou  $m=1-2/n$ .

Outras simplificações dos parâmetros da eq. VG são também possíveis. Uma das alternativas é relacionar os parâmetros  $\theta_s$  e  $\theta_r$  a propriedades físicas do solo. Nesse caso, a umidade de saturação pode ser determinada pela relação envolvendo a densidade do solo e a densidade da partícula, e a umidade residual ser considerada o conteúdo de água a 1.500kPa (15.000cm de sucção). Essa proposta é atraente, pois além de reduzir o número dos parâmetros da equação limita a obtenção de valores de umidade incoerentes com o comportamento físico possível, ou seja, valores de umidade menores que zero para sucções muito altas e maiores que a porosidade total para a sucção nula (van Lier & Dourado Neto, 1993). No entanto, relacionar a umidade residual a um valor fixo e conhecido da curva de retenção pode ser um erro, uma vez que não é muito clara sua conceituação física, sujeita ainda a diversas interpretações (Vanapalli et al., 1998; Aoda, 2000; Haverkamp et al., 2005). Sendo assim, entende-se que o  $\theta_r$  ainda não deve ser assumido como um parâmetro físico, mas uma constante empírica a ser estimada, podendo inclusive assumir valores menores que zero, tal como realizado por van Lier & Dourado Neto (1993) e Haverkamp et al. (2005). Alguns estudos dão indicativos que apoiam essa afirmativa, através das evidências de baixas correlações entre  $\theta_r$  e propriedades físico-químicas dos solos (Luckner et al., 1989; Tietje & Tapkenhinrichs, 1993; Porebska et al., 2006). Apesar disso, muitos trabalhos (Wösten et al., 1995; Wösten et al., 1999; Hodnett & Tomasella, 2002; Guber et al., 2006; Merdun, 2006; Sharma et al., 2006; Sen Lu et al., 2008) continuam a restringir o parâmetro  $\theta_r$  em valores maiores ou iguais a zero, a fim de que a curva não assumia valores negativos,

atribuindo assim, mesmo que parcialmente, significado físico a esse parâmetro. O código computacional RETC (van Genuchten et al., 1991) é um exemplo de programa que otimiza os parâmetros da eq. VG considerando essa restrição nos valores de  $\theta_r$ . Assim, torna-se necessário criar motivação para utilização de  $\theta_r$  como sendo um parâmetro sem qualquer significado físico, podendo dessa forma assumir valores negativos. Com isso, espera-se aprimorar a estimativa da curva de retenção de umidade na faixa de variação pré-estabelecida para a variável independente  $h$ .

O objetivo deste trabalho foi avaliar se curvas de retenção de umidade estimadas para umidades residuais negativas apresentam melhor desempenho de ajuste do que as correspondentes curvas parametrizadas para valores positivos de  $\theta_r$ . Para tanto, foi alterado o código RETC para que  $\theta_r$  assumisse valores menores que zero, considerando na versão modificada e original do RETC que  $m=1-1/n$  e que  $\theta_s$  é um parâmetro conhecido. Neste estudo também se propôs um valor mínimo de  $\theta_r$ . Isso foi feito a fim de se definir uma faixa de restrição nos valores de  $\theta_r$ , sem que haja prejuízo na qualidade do ajuste da curva de retenção.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Modificação do Programa RETC

O código do RETC foi alterado neste trabalho de modo que o parâmetro  $\theta_r$ , designado como variável  $B(8)$  no código, fosse otimizado em dois casos: a) sem restrição no seu valor, podendo ser negativo (caso 1:  $\theta_r < 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); b) com restrição, podendo assumir valores negativos até o limite de  $-0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (caso 2:  $\theta_r \geq -0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Esse programa alterado, considerando os dois casos, foi chamado de RETC modificado e as transformações realizadas no código original não foram aqui apresentadas por limitação de espaço.

Em ambos os casos (RETC e RETC modificado) assumiu-se que  $m=1-1/n$  ( $0 < m < 1$ ) e que  $\theta_s$  fosse um parâmetro conhecido.

### Seleção dos Dados

Foram escolhidos cinco bancos de dados de solos, provenientes de diferentes países, com informações de curvas de retenção de umidade. São eles: HYPRES (Hydraulic Properties of European Soils, Wösten et al., 1999), UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database, com solos de diversos países, em especial dos EUA, Nemes et al., 2001), SPPWDB (Soil Physical Properties Web Database for GOSSYM and GLYCIM Crop Simulation Models, com solos do Estado de Mississipi/EUA, Ali et al., 2004), Southern Region (SR) database (com solos do sul dos EUA, Ahuja et al., 1984, 1989; Timlin et al., 1999) e base de dados do Brasil (Tomasella et al., 2000, 2003).

Nessas bases identificaram-se 5.445 amostras com curvas de retenção, das quais apenas 1.193 foram selecionadas por possuírem dados em todas as faixas da curva (abaixo definidas), desde a faixa úmida à seca. Isto foi feito, a fim de que os parâmetros estimados da eq. VG fossem representativos da curva completa, além de se padronizar um critério de seleção dos solos relativamente aos seus dados de curvas de retenção, já

que muitos possuíam informações de  $\theta(h)$  apenas na faixa úmida. Neste trabalho, entendeu-se como curva completa aquela que apresentasse dados medidos nas seguintes faixas: a) ( $30 \text{ cm} \leq h \leq 80 \text{ cm}$ ); b) ( $80 \text{ cm} < h < 250 \text{ cm}$ ); c) ( $250 \text{ cm} \leq h \leq 500 \text{ cm}$ ); d) ( $500 \text{ cm} < h < 9.000 \text{ cm}$ ); e) ( $9.000 \text{ cm} \leq h \leq 18.000 \text{ cm}$ ), além de ser conhecido seu valor de  $\theta_s$ . Por padronização, dados fora das faixas acima não foram considerados.

### Execução do Programa RETC original e RETC modificado

Neste trabalho foram otimizados os três parâmetros da eq. VG ( $m$ ,  $\alpha$  e  $\theta_r$ ), considerando na execução dos programas RETC e RETC modificado os seguintes valores iniciais:  $m=0,5$ ;

$$\theta_r = \theta(h \sim 15.000 \text{ cm}) - 0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}; \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\left[ \left( \frac{\theta(h \sim 60 \text{ cm}) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{(1-m)}}{(h \sim 60 \text{ cm})} \quad (3)$$

, onde  $h \sim 15.000 \text{ cm}$  e  $h \sim 60 \text{ cm}$  significam o dado de  $h$  mais próximo de  $15.000 \text{ cm}$  (na faixa e) e mais próximo de  $60 \text{ cm}$  (na faixa a), respectivamente.

A otimização de  $\theta_r$  foi realizada segundo três cenários de restrição nos seus valores: caso 1 ( $\theta_r < 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); caso 2 ( $\theta_r \geq -0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); caso 3 ( $\theta_r \geq 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), sendo os dois primeiros contemplados no RETC modificado e o último no RETC original. Os três cenários foram aplicados para cada um dos 1.193 solos selecionados acima.

Utilizando a otimização dos parâmetros nas 1.193 amostras para o cenário do caso 1 de restrição de  $\theta_r$ , foram novamente selecionados somente aqueles solos em que o  $\theta_r$  foi negativo.

### Análise Estatística

Para os solos selecionados conforme o procedimento acima (amostras com  $\theta_r < 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , no caso 1) e segundo cada um dos três casos de restrição de  $\theta_r$  foram calculados os valores de umidade nas sucções medidas, com base nos correspondentes parâmetros estimados do modelo de van Genuchten ( $m$ ,  $\alpha$  e  $\theta_r$ ) e na Equação (1). Apenas nos casos 1 e 2, também as curvas estimadas foram extrapoladas para sucções de até  $30.000 \text{ cm}$ . A qualidade de ajuste dos valores calculados da curva de retenção aos valores medidos de umidade foi mensurada pelo Erro Médio Quadrático (em % de umidade volumétrica), expresso na forma abaixo:

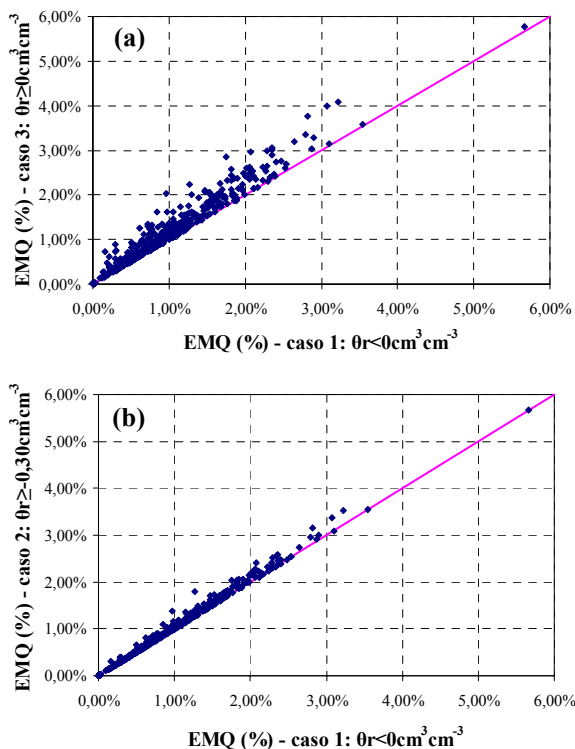
$$EMQ(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y'_i)^2}{n}}{n}} \times 100 \quad (4)$$

, onde  $y_i$  e  $y'_i$  são, respectivamente, os valores medidos e calculados da curva de retenção, entre os  $n$  pontos medidos da curva.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No caso 1, entre as 1.193 amostras inicialmente selecionadas 473 (40%) apresentaram  $\theta_r < 0$ , não havendo uma tendência da maioria dessas assumir uma determinada classe textural. Entre as amostras que possuíam dados de textura (448) dentre as 473, 44% foram classificadas como classes arenosas, seguidas de 37% como classes siltosas.

Nas Figuras 1 são apresentadas as comparações entre os 473 EMQs correspondentes definidos para os casos 1 e 3 (Figura 1a) e para os casos 1 e 2 (Figura 1b)



**Figuras 1.** Comparação entre os correspondentes EMQs dos 473 solos nos (a) casos 1 e 3; (b) casos 1 e 2

Percebe-se na Figura 1a que os EMQs do caso 3 foram superiores aos resíduos correspondentes do caso 1 para todos os 473 solos, observando-se uma diferença máxima de EMQ entre os dois casos, para todos os solos avaliados, de aproximadamente 1,10% ( $0,011\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ). A diferença entre os resíduos correspondentes dos dois casos seguiu a seguinte distribuição para os solos selecionados: 48% com diferenças menores que 0,10%, 44% entre 0,10% e 0,50%, e 8% com diferenças entre 0,50% e 1,10%. Ou seja, 52% dos solos apresentaram diferenças entre os EMQs correspondentes dos dois casos (1 e 3) superiores a 0,10%. Esse resultado comprova que a restrição para que a umidade residual seja apenas positiva prejudica de forma não desprezível o ajuste da curva de retenção.

Fazendo a comparação entre os erros correspondentes dos casos 1 e 2 (Figura 1b), percebe-se que os EMQs do caso 2 foram superiores aos do caso 1 em no máximo 0,53% ( $0,0053\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ), para os 473 solos. A diferença entre os erros correspondentes dos dois casos seguiu a seguinte distribuição para os solos selecionados: 86% com diferenças menores que 0,10% e 14% entre 0,10% e 0,53%. Isso indica que a performance da estimativa das curvas de retenção nesses dois cenários para a maioria dos solos (86%) foi muito semelhante entre si, o que leva a crer que a magnitude de  $-0,30\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  é aceitável como valor de limite mínimo de  $\theta_r$ .

A extrapolação do cálculo das curvas de retenção de umidade dos casos 1 e 2 para sucções de até 30.000cm apresentou em alguns solos umidades

negativas. No caso 1, a sucção mínima na qual as umidades para os 473 solos foram positivas foi de 16.450cm, e no caso 2 foi de 20.800cm. Sendo assim, nos casos que as curvas de retenção de umidade forem parametrizadas considerando a eq.VG e  $\theta_r < 0\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ , deve-se evitar que as mesmas sejam extrapoladas para valores de sucções superiores às verificadas nos pontos medidos da curva.

## CONCLUSÕES

1. A umidade residual  $\theta_r$  pode assumir valores negativos, com a prerrogativa de melhor estimar as curvas de retenção de umidade, em relação à parametrização quando se assume para  $\theta_r$  apenas valores maiores ou iguais a zero. Isto reforça a tese de que  $\theta_r$  é uma constante empírica na equação de van Genuchten, sem qualquer significado físico;
2. As estimativas das curvas de retenção dos 473 solos com umidade residual negativa, considerando  $\theta_r \geq -0,30\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  (caso 2) e  $\theta_r < 0\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  (caso 1), apresentam performance muito semelhante entre si, sendo por isso sugerido o valor de  $-0,30\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  como o limite mínimo de  $\theta_r$ . Sugere-se também que essa restrição de  $\theta_r$  seja adotada nos modelos de estatísticos de otimização dos parâmetros da eq.VG, tal como realizada no RETC modificado.
3. Deve-se evitar a extrapolação das curvas de retenção, determinadas com base em  $\theta_r$  menores que zero, para sucções muito maiores que a máxima efetivamente medida.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores Dr. Allan Lilly (Macaulay Institute/Europe), Dr. Attila Nemes (USDA-ARS), Dr. Dennis Timlin (USDA-ARS), Dr. Javier Tomasella (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE) e Dr. Yakov Pachepsky (USDA-ARS) pela cessão dos dados, e aos pesquisadores Dr. Durval Dourado Neto (USP) e Dr. Harry Vereecken (Bonn University/Germany) por prestarem sugestões de conteúdo deste trabalho. Os autores também agradecem à CPRM pelo apoio institucional e financeiro, sem o qual esse trabalho não teria sido realizado.

## REFERÊNCIAS

- AHUJA, L. R.; CASSEL, D. K.; BRUCE, R. R. & BARNES, B. B. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. *Soil Sci.*, 148:404-411, 1989.
- AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E. & NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:699-702, 1984.
- ALI, I.; WHISLER, F. D.; IQBAL, J.; JENKINS, J.N. & MCKINION, J. M. Soil physical properties web database for GOSSYM and GLYCIM Crop Simulation Models. *Agron. J.*, 96:1706-1710, 2004.
- AODA, T. Physical definition of residual water content in unsaturated soils. In: RAHARDJO, H.; TOLL, D.G.; LEONG, E.C., eds. *Unsaturated soils for Asia. Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT-Asia 2000*. Singapore, 2000. p.91-93.

- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K. & BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Sci. agric.*, 57:191-192, 2000.
- GUBER, A.K.; PACHEPSKY, YA.; VAN GENUCHTEN, M. Th.; RAWLS, W. J.; JACQUES, D.; SIMUNEK, J.; CADY, R.E. & NICHOLSON, T.J. Field-scale water flow simulations using ensembles of pedotransfer functions for soil water retention. *Vadose Zone J.*, 5:234-247, 2006.
- HAVERKAMP, R.; LEIJ, F. J.; FUENTES, S.; SCIORTINO, A. & ROSS, P.J. Soil water retention: I. Introduction of a shape index. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 1881-1890, 2005.
- HODNETT, M. G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer function developed for tropical soils. *Geoderma*, 108:155-180, 2002
- LUCKNER, L.; VAN GENUCHTEN, M.Th. & NIELSEN, D.R.A. consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. *Water Resources Research*, 25:2187-2193, 1989.
- MERDUN, H. Pedotransfer functions for point and parametric estimations of soil water retention curve. *Plant Soil Environ.*, 52:321-327, 2006.
- NEMES, A.; SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. & WÖSTEN, J.H.M. Description of the unsaturated soil hydraulic database. UNSODA version 2.0. *J. Hydrol.*, 251:151-162, 2001.
- POREBSKA, D.; SLAWINSKI, C.; LAMORSKI, K. & WALCZAK, R.T. Relationship between van Genuchten's parameters of the retention curve equation and physical properties of soil solid phase. *Int Agrophysics*, 20:153-159, 2006.
- SEN LU; REN, T.; GONG, Y. & HORTON, R. Evaluation of three models that describe soil water retention curves from saturation to oven dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:1542-1546, 2008.
- SHARMA, S.K.; MOHANTY, B.P. & ZHU, J. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:1430-1440, 2006.
- TIETJE, O. & TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1088-1095, 1993.
- TIMLIN, D.J.; AHUJA, L.R.; PACHEPSKY, YA.; WILLIAMS, R.D.; GIMENEZ, D. & RAWLS, W. Use of Brooks-Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1086-1092, 1999
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:327-338, 2000.
- TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, YA.; CRESTANA, S. & RAWLS, W.J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1085-1092, 2003.
- 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.
- VAN GENUCHTEN, M.Th.; LEIJ, F.J. & YATES, S.R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Ada, OK., 1991. 85p.
- VAN LIER, D. J. & DOURADO NETO, D. Valores extremos de umidade do solo referentes ao modelo de van Genuchten. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:325-329, 1993.
- VANAPALLI, S. K.; SILLERS, W. S. & FREDLUND, M.D. The meaning and relevance of residual state to unsaturated soils. In: 51<sup>st</sup> Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta, 1998.
- WÖSTEN, J.H.M.; FINKE, P.A. & JANSEN, M.J.W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66:227-237, 1995.
- WÖSTEN, J.H.M.; LILLY, A.; NEMES, A. & BAS, C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90:169-185, 1999.