

## ESTIMATIVA DAS CURVAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E DE RETENÇÃO A PARTIR DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO

Adilson Pinheiro<sup>1</sup> e Lizandra Poeta Teixeira<sup>2</sup>

**Resumo:** O movimento de água no solo é dependente das suas características físico-hídricas, que pode ser descrito pela condutividade hidráulica, pelo conteúdo de água e pela curva de retenção. A condutividade hidráulica é uma grandeza física que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso. A curva de retenção da água pode ser definida como sendo a relação funcional entre a quantidade de solução em um volume do solo em equilíbrio com a tensão aplicada. Este trabalho teve por finalidade determinar a curva de retenção e a condutividade hidráulica em 7 pontos amostrais, situados na bacia experimental do ribeirão Concórdia, localizando no município de Lontras em Santa Catarina. Para tanto, o modelo BEST, que é baseado no método semifísico de “Beerkan”, foi utilizado e juntamente com este as informações de curva granulométrica, da massa específica aparente, da porosidade e da infiltração tridimensional. Os solos dos pontos amostrais são, em sua maioria, franco siltosos. O maior valor da condutividade hidráulica saturada foi obtido na mata nativa ( $0,265 \text{ mm s}^{-1}$ ) e o menor valor foi na área de milho com plantio convencional ( $0,013 \text{ mm s}^{-1}$ ). Observou-se que existiu gradiente dos potenciais totais na matriz do solo, variando da mata nativa, para a floresta de Pinus, e para o milho e a pastagem.

**Palavras-chave:** Condutividade hidráulica. Curva de retenção. Modelo BEST.

### 1 Introdução

O movimento de água no solo é dependente das suas características físico-hídricas, que pode ser descrito pela condutividade hidráulica, pelo conteúdo de água e pela curva de retenção. Libardi (2000) considera que “a condutividade hidráulica é uma grandeza física que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso e que depende, portanto, tanto das propriedades do meio como das propriedades do fluido”. A condutividade hidráulica é uma função da umidade do solo, ou seja, quanto maior for a umidade maior será o seu valor.

Destacam-se como principais elementos físicos do solo que atuam sobre a condutividade hidráulica: o tamanho das partículas, o índice de vazios, a estrutura, a estratificação e grau de saturação do solo (ALONSO, 2005).

A curva de retenção da água pode ser definida como sendo a relação funcional entre a quantidade de solução em um volume do solo em equilíbrio com a tensão aplicada. É representada respectivamente pela umidade volumétrica ( $\theta$ ) e pelo potencial

matricial ( $\psi_m$ ). A distinção que pode ser encontrada nas curvas de retenção tem, como principais responsáveis, a estrutura do solo, o teor de umidade inicial, o índice de vazios, o tipo de solo, entre outros fatores (SILVA et al., 2006).

Com a curva característica de água no solo são possíveis inúmeras aplicações, destacando-se a determinação da porosidade drenável, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, condutividade hidráulica não saturada, além de balanço hídrico, determinando-se a variabilidade do armazenamento de água no solo (CENTURION; ANDRIOLI, 2000; MELLO et al., 2005).

Lassabatère et al. (2006) descrevem o modelo BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments) baseado no método semifísico de “Beerkan”, para determinação dos parâmetros das curvas da condutividade hidráulica  $K(\theta)$  e de retenção  $h(\theta)$ .

As representações das curvas da condutividade hidráulica e de retenção são realizadas pelos modelos de Van Genuchten (1980):

<sup>1</sup> Universidade Regional de Blumenau (FURB) – Campus II, Rua São Paulo, 3250 – CEP 89030-000 – Blumenau/SC.  
E-mail: pinheiro@furb.br

<sup>2</sup> E-mail: lilioceano@yahoo.com.br

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

onde

$$m = 1 - \frac{2}{n}$$

e Brooks e Corey (1964) expressam por:

$$K_0 = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta$$

onde:

$\theta$  = umidade volumétrica ( $m^{-3} m^{-3}$ ),  
 $\theta_r$  = umidade volumétrica residual ( $m^{-3} m^{-3}$ ),  
 $\theta_s$  = umidade volumétrica saturada ( $m^{-3} m^{-3}$ ),  
 $h$  = potencial matricial (m),  
 $h_g$  = valor de escala de  $h$  (m),  
 $m$  e  $n$  = parâmetros de forma,  
 $K_s$  = condutividade hidráulica saturada do solo ( $m h^{-1}$ ),  
 $\eta$  = o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Estas funções são descritas analiticamente por cinco parâmetros: dois de forma,  $m$  ou  $n$  e  $\eta$ , relacionados com a textura, obtidos a partir da curva de distribuição do tamanho das partículas e da porosidade, e três de normalização  $\theta_s$ ,  $K_s$  e  $h_g$ , que resultam da estrutura dos solos.

Os parâmetros de forma da curva de retenção ( $m$  e  $n$ ) são obtidos através das relações seguintes:

$$m = \frac{1}{p_m} (\sqrt{1 + p_m^2} - 1)$$

$$n = \frac{2}{1 - m}$$

onde  $p_m$  é estimado por (ZATARÁIN et al., 2003):

$$p_m = \frac{MN}{1 + M} (1 + k)^{-1}$$

sendo o  $k$  estimado por (FUENTES et al., 1998):

$$k = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)}$$

onde:

$M$  e  $N$  = parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas,  
 $p_m$  = índice de forma do meio,  
 $m$  e  $n$  = parâmetros de forma da curva de retenção,  
 $k$  = coeficiente,  
 $s$  = dimensão fractal relativa.

O parâmetro de forma da curva de condutividade hidráulica ( $\eta$ ) é estimado por:

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p$$

Onde:

$\eta$  = parâmetro de forma da curva de condutividade hidráulica,  
 $m$  e  $n$  = parâmetros de forma da curva de retenção,  
 $p$  = tortuosidade.

O parâmetro de normalização  $\theta_s$  é estimado pela umidade gravimétrica saturada da massa específica do solo, enquanto  $K_s$  e  $h_g$  são obtidos através da modelagem dos experimentos de infiltração (SOUZA et al., 2008).

O parâmetro  $h_g$  é estimado por:

$$h_g = \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_o) \left[ 1 + \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right] k_s}$$

sendo  $c_p$  expresso como:

$$c_p = \Gamma \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \left[ \frac{\Gamma \left( n\eta + \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma \left( n\eta + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(n\eta + m)} \right]$$

onde:

$\theta$  = umidade volumétrica ( $m^{-3} m^{-3}$ ),

$\theta_s$  = umidade volumétrica saturada ( $m^{-3} m^{-3}$ ),  
 $S$  = sorvidade ( $mm s^{-1/2}$ ),  
 $c_p$  = valor de escala de  $h$  (m),  
 $m$  e  $n$  = parâmetros de forma da curva de retenção,  
 $K_s$  = condutividade hidráulica saturada do solo ( $m h^{-1}$ ),  
 $\eta$  = o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica,  
 $\Gamma$  = função gama clássica.

## 2 Material e métodos

Para a determinação da curva de retenção ( $h(\theta)$ ) e da condutividade hidráulica ( $K(\theta)$ ) e dos parâmetros intrínsecos a estas, foi utilizado o modelo BEST, desenvolvido por Lassabatère et al. (2006), que é baseado no método semifísico de “Beerkan”, descrito acima.

Para a determinação dos parâmetros das curvas foram utilizadas as informações de curva granulométrica, massa específica aparente, porosidade e de infiltração tridimensional, obtida com anel simples. Foram realizadas amostragens e ensaios em 7 pontos amostrais, situados na bacia experimental do ribeirão Concórdia, pertencente à vertente atlântica do Estado de Santa Catarina.

### 2.1 Granulometria

A granulometria foi determinada por peneiramento e por sedimentação. O ensaio de determinação da granulometria por sedimentação seguiu a NBR 7181 (ABNT, 1984). A amostra foi preparada por quarteamento, tomando a quantidade de amostra preparada com secagem prévia. A amostra de solo coletada foi colocada em uma peneira de 2 mm, para a separação da fração grossa ( $> 2,0$  mm) e da fração fina ( $< 2,0$  mm).

Para a análise granulométrica das frações grosseiras foi utilizado o processo de peneiramento, que consistiu na utilização de agitador mecânico para peneirar o material nas peneiras de malha 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8 e 2,0 mm. As amostras retidas nelas foram pesadas e suas massas anotadas.

O material que não ficou retido na peneira de 2,0 mm, ou seja, a fração fina foi pesada para a determinação do peso total da amostras e separada para a realização do ensaio de sedimentação. Neste caso, o material é transferido para um béquer com a

adição de um defloculante (trifosfato de sódio) para a desagregação das partículas. Após 12 horas, as amostras foram transferidas para uma proveta. Foram feitas leituras dos tempos de sedimentação juntamente com a temperatura, utilizando-se de um densímetro e um termômetro, respectivamente.

A alíquota de fração fina destinada ao ensaio de peneiramento foi retirada da proveta ao fim do ensaio e então colocada para secagem em estufa a aproximadamente 105°C. Após a secagem e com o auxílio de um agitador mecânico, o material em questão passou pelas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, 0,075 mm, para, assim, registrarem-se as massas.

### 2.2 Infiltração tridimensional

A infiltração tridimensional foi determinada com ensaios em um anel de diâmetro de 25 cm e 25 cm de altura. A escolha dos pontos foi feita pela diferença nos usos da terra existente. Em cada ponto de amostragem foram feitos dois ensaios de infiltração, visando a obter reprodutibilidade.

O ensaio consiste em penetrar no solo 1 cm de profundidade. Os volumes de água infiltrada foram medidos nos instantes de tempo de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60 minutos.

## 3 Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentadas as composições granulométricas dos solos dos pontos amostrais. Observa-se que ocorre heterogeneidade das composições granulométricas. Ao se aplicarem essas frações granulométricas no diagrama triangular das classes texturais do solo (LEMOS; SANTOS, 1996), observa-se que, na camada superficial (0 a 20 cm), os solos são classificados, em sua maioria, como franco silteosos.

Os valores gerados pelo modelo BEST são apresentados na Tabela 2. Os valores de  $m$  variaram entre 0,054 (mata nativa) e 0,136 (milho em cultivo convencional). Constata-se que o maior valor é cerca de 3 vezes superior ao menor. No entanto, os valores de  $n$  variam pouco. Eles estão compreendidos entre 2,114 e 2,314. A aplicação destes parâmetros resulta nas curvas de retenção apresentadas na Figura 1. De acordo com Trentin (2005), mesmo

que os solos pertençam à mesma classe textural, podem ter curvas de retenção distintas, principalmente devido às diferenças

de granulometria, teor de matéria orgânica, tipo de argila e diferenças de microestrutura.

**Tabela 1 - Composição granulométrica (%), tipo de solo, uso da terra e manejo do solo nos pontos amostrais.**

Ponto	Areia	Silte	Argila	Tipo de solo	Uso da terra	Manejo do solo
1	21,39	67,24	11,36	Franco Siltoso	Pastagem Perene	
2	17,92	77,88	4,21	Franco Siltoso	Floresta de Pinus com idade de 3 anos	
3	38,48	48,55	12,97	Franco	Cultivo de Cereais (Milho)	Plantio convencional, sem rotação de culturas
4	34,83	62,11	3,06	Franco Siltoso	Reflorestamento de Eucalipto com idade de 9 anos	
5	17,95	78,41	3,64	Franco Siltoso	Pastagem perene	
6	25,29	67,41	7,31	Franco Siltoso	Cultivo de Cebola	Plantio Convencional, com rotação de cultura
7	38,62	40,47	20,90	Franco	Mata Nativa	

**Tabela 2 - Parâmetros de forma das curvas de distribuição das partículas e parâmetros de forma das curvas das funcionais de  $h(\theta)$  e  $K(\theta)$**

Ponto	Parâmetros de forma das curvas de distribuição das partículas				Parâmetros de forma das curvas das funcionais de $h(\theta)$ e $K(\theta)$					
	M	N	MN	Dg	m	n	$\eta$	cp	Ks	S
1	0,173	2,42	0,42	149,35	0,083	2,182	13,993	2,373	0,082	1,077
2	0,229	2,594	0,594	114,15	0,124	2,282	10,082	2,167	0,071	0,8211
3	0,169	2,408	0,408	303,428	0,096	2,213	12,387	2,3	0,044	0,737
4	0,261	2,707	0,706	166,136	0,136	2,314	9,371	2,117	0,034	1,60
5	0,223	2,573	0,573	129,12	0,116	2,263	10,597	2,2	0,065	1,19
6	0,183	2,448	0,4478	170,93	0,099	2,219	12,126	2,286	0,013	2,455
7	0,097	2,216	0,214	981,893	0,054	2,114	20,496	2,575	0,265	0,487

Observa-se que existe gradiente dos potenciais totais na matriz do solo, variando da mata nativa, para floresta de *Pinus*, e pastagem e milho. Além disto, verifica-se que

a curva de retenção do reflorestamento de eucalipto apresenta potencial total superior àquele da floresta de *Pinus*.

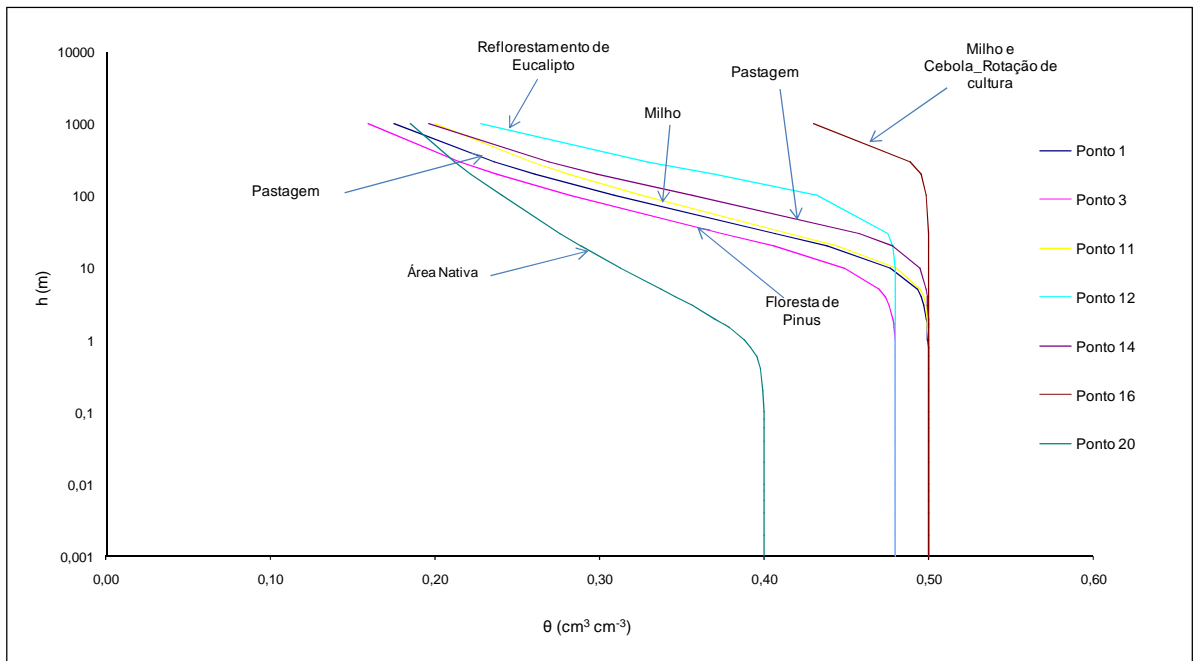


Figura 1 - Curvas de retenção dos pontos amostrais

O coeficiente  $\eta$  varia entre 9,371 (reflorestamento de eucalipto) e 20,496 (mata nativa). A aplicação deste parâmetro é mostrada na Figura 2, onde é representada a variação da condutividade hidráulica em função da umidade do solo. Observa-se crescimento da curva de condutividade hidráulica da mata nativa para a pastagem. A seqüência intermediária é floresta de *Pinus*, reflorestamento de eucalipto e milho. Isto implica considerar que a curva de condutividade hidráulica apresenta uma variação que está associada ao uso florestal,

passando pela agricultura e finalizando com a pastagem.

O maior valor da condutividade hidráulica saturada foi obtido na mata nativa ( $0,265 \text{ mm s}^{-1}$ ) e o menor, na área de milho com plantio convencional ( $0,013 \text{ mm s}^{-1}$ ). A variação entre os extremos é de cerca de 20 vezes, o que pode ser considerada adequada ao solo da bacia. Souza et al. (2008) estimaram condutividades hidráulicas em três Latossolos Amarelos e três Neossolos Flúvicos, cujos valores variam entre  $0,01$  e  $0,19 \text{ mm s}^{-1}$ .

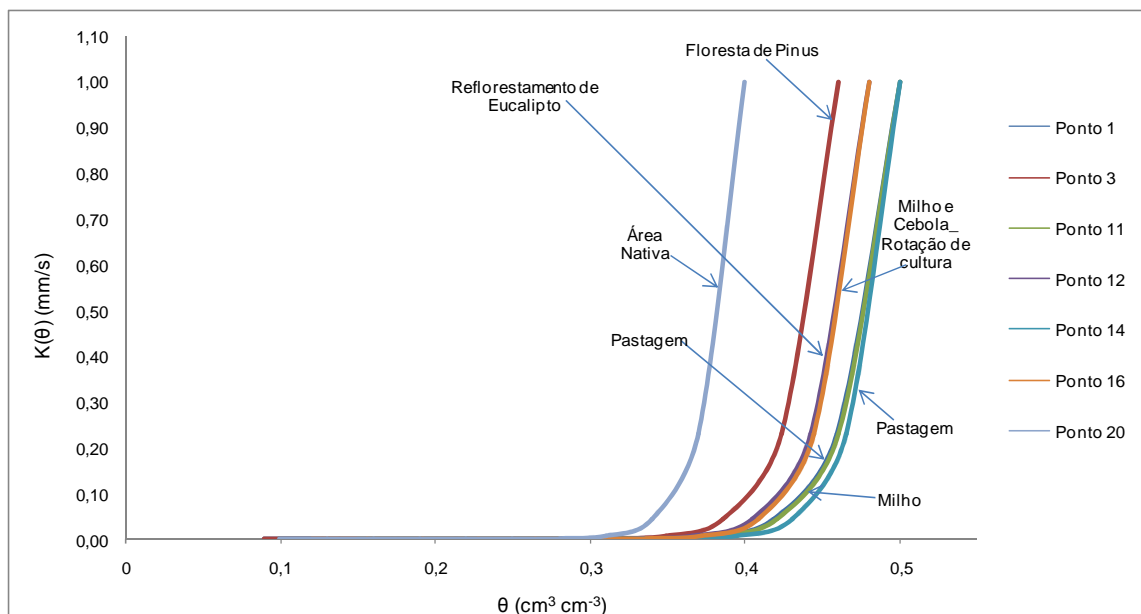


Figura 2 - Curvas de condutividade hidráulica dos pontos amostrais.

No sentido inverso, foram obtidos os valores da sorvidade. Esta propriedade física do solo descreve a capacidade de um solo homogêneo absorver água na ausência de efeitos gravitacionais. Ela varia entre 0,487 (mata nativa) e 2,455 mm s<sup>-1/2</sup> (plantio de milho com manejo convencional). Silva e Libardi (2000) determinaram a sorvidade de um solo classificado como Terra Roxa Estruturada, usando um permeametro de disco. Esses autores encontraram valores de sorvidade entre 0,149 a 2,65 mm s<sup>-1/2</sup>. Os valores da sorvidade variaram em função das condições iniciais da superfície.

Souza et al. (2008) estimaram a sorvidade com o modelo BEST em três Latossolos Amarelos e três Neossolos Flúvicos, variando entre 0,49 e 2,48 mm s<sup>-1/2</sup>. Por outro lado, Souza et al. (2008)

verificaram que os valores de sorvidade foram maiores para as superfícies sem crostas que para as superfícies com crosta.

#### 4 Conclusões

- Pelos ensaios granulométricos os solos destes pontos amostrais foram classificados, em sua maioria, como franco siltosos;
- A mata nativa apresentou o maior valor de condutividade hidráulica saturada. O contrário foi observado para a área com cultivo de milho em plantio convencional;
- Os potenciais totais da matriz do solo apresentaram gradiente que variaram nos três meios (maior para menor potencial): mata nativa, floresta de *Pinus*, milho e pastagem.

---

#### 5 Estimation of hydraulic conductivity and retention curves from physical characteristics of soil

**Abstract:** *Water movement in soil is dependent on its physical-hydric characteristics, which can be described by the hydraulic conductivity, and through the water content and retention curve. The hydraulic conductivity is a physical value that expresses the ease with which the fluid is transported through a porous medium. The water retention curve can be defined as being the functional relation between the quantity of solution in a volume soil in equilibrium with the applied tension. This work had the finality to determine the retention (h(θ)) and hydraulic conductivity (K(θ)) curve on 7 sampling points, located in the experimental basin of Ribeirão Concordia, located in the municipality of Lontras in Santa Catarina. For that matter the BEST Model, which is based on the method of "Beerkan" was used, as well as, the information granulometric curve, specific mass, porosity and tridimensional infiltration. The sampling points of the soil are mostly silty loam. The biggest value of saturated hydraulic conductivity was obtained in the native forest (0,265 mm s<sup>-1</sup>) and the lowest value was in the maize area with conventional tillage (0,013 mm s<sup>-1</sup>). It is observed that there is a gradient of total potential in the soil matrix, ranging from native forest, pine forest, maize and pasture.*

**Key-words:** Hydraulic conductivity. Retention Curve. BEST Model.

---

#### 6 Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181 - solo: análise granulométrica: método de ensaio**. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. 13p.

ALONSO, T. P. **Condutividade Hidráulica de Solos Compactados em Ensaio com Permeâmetro de Parede Flexível**. São Paulo: USP, 2005, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper, n. 3, Fort Collins: Colorado State University, 1964.

CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I, Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.24, n. 4, p. 701-709, 2000.

FUENTES, C; VAUCLIN, M., PARLANGE, J Y., HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: BAVEYE, P., PARLANGE, J. Y.; STEWART, B. A. (eds.) **Fractals in soil science**. Boca Raton: CRC, 1998.

LASSABATÉRE,L.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v. 70, 2006.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D.; **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

LIBARDI, P. L. Infiltração de água no solo. In: \_\_\_\_\_. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2000.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, C. G.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M. Modelo para determinação dos parâmetros da equação e Van Genuchten para um Cambissolo. **Brasileira de Eng, Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 23-29, 2005.

SILVA, E. B.; LIBARDI, P. L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 3, p.525 – 529, 2000.

SILVA, E. M.; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.41, n.2, p. 323-330, 2006.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JAMIRILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, 2008.

TRENTIN, C. V. **Diagnóstico voltado ao planejamento do uso de águas residuárias**

**para irrigação nos cinturões verdes da região metropolitana de Curitiba**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005, Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

VAN GENUTCHEN, M. TH. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, 1980.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad Del suelo a partir de la curva granulométrica. In: Congreso Nacional de Irrigación, 13, 2003, Zacatecas. **Resumos...** Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnologia de Riego y drenaje, v.2, 1993.

## 7 Agradecimentos

Agradecemos ao MCT/FINEP/CT-Hidro-CNPq, Edital 04/2005 Bacias Representativas, convênio 3490/05, pelo financiamento da pesquisa, ao CNPq (Proc 301156/2008-5) pela concessão da bolsa de produtividade do primeiro autor e de mestrado do segundo autor e ao prof. Eduardo S. de Souza, do CCA/UFPB, pelo auxílio no uso do modelo BEST.