



# Uso do índice S na determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos do cerrado brasileiro

Rui da S. Andrade<sup>1</sup> & Luís F. Stone<sup>2</sup>

## RESUMO

O emprego de modelos numéricos permite determinar a condutividade hidráulica não-saturada,  $K(h)$ , de modo mais rápido e a um custo menor que a medição em campo; para tanto, é necessário o desenvolvimento de modelos cada vez mais acurados. Propôs-se, neste trabalho, verificar se o modelo baseado no índice S (declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão) e na tensão da água nesse ponto de inflexão ( $h_i$ ) é adequado para a determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos de diferentes classes texturais. O estudo foi realizado sobre 2166 amostras de solo, das quais constavam informações sobre textura, condutividade hidráulica saturada e retenção da água do solo, registradas nos bancos de dados dos Laboratórios de Solo das Embrapa Arroz e Feijão e Embrapa Cerrados, abrangendo solos sob cerrado das regiões CO, N e NE do Brasil. Verificou-se que a condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva de retenção ( $K_i$ ) pode ser determinada a partir do índice S e de  $h_i$ , independentemente da textura do solo, e que determinações de  $K(h)$  feitas com base em  $K_i$  apresentaram altas correlações com valores medidos. O uso do índice S e de  $h_i$  na determinação de  $K(h)$  deve ser mais testado para determinar seu poder de predição.

**Palavras-chave:** curva de retenção de água, textura do solo, tensão da água do solo

# Use of S index in the determination of unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian 'Cerrado' soils

## ABSTRACT

Unsaturated hydraulic conductivity,  $K(h)$ , can be determined rapidly and economically using numerical models in comparison to field measurements. For this is necessary to develop more accurate models. The objective of this paper was to verify if the model based upon S index (the slope of the soil-water retention curve at its inflection point) and soil-water tension at this inflection point ( $h_i$ ) is suitable to determine unsaturated hydraulic conductivity of soils of different textural classes. The study was done on 2166 samples covering 'Cerrado' soils of Mid-West, North and Northeast regions of Brazil, of which there was information about soil texture, saturated hydraulic conductivity, and soil-water retention in data base of Soil Laboratories of Embrapa Arroz e Feijão and Embrapa Cerrados. It was observed that unsaturated hydraulic conductivity at the inflection point of soil-water retention curve ( $K_i$ ) can be determined from S index and  $h_i$ , independently of soil texture. Determinations of  $K(h)$  based upon  $K_i$  showed a high correlation to measured values. The use of S index and  $h_i$  to determine  $K(h)$  should be further tested to determine its predictive power.

**Key words:** soil-water retention curve, soil texture, soil-water tension

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica/UFT, CEP 77020-120, Palmas, TO. Fone (63) 3232-8020. E-mail: andradersilva@uft.edu.br

<sup>2</sup> Embrapa Arroz e Feijão, CP 179, CEP 75375-000, Santo Antônio de Goiás, GO. Fone (62) 3533-2151. E-mail: stone@cnpaf.embrapa.br

## INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica é um atributo do solo que assume importante papel na resolução de problemas que envolvem irrigação, drenagem, conservação de recarga do lençol freático, poluição, infiltração e controle de enxurrada (Stone & Silveira, 1978). Lacerda et al. (2005) afirmam que a resolução desses problemas se inicia pela avaliação da condutividade hidráulica de solos não-saturados.

O conhecimento da condutividade hidráulica em nível experimental esbarra na morosidade, no custo elevado e na alta variabilidade de seus valores, no espaço e no tempo. Usam-se, como alternativa, modelos numéricos que calculam esta condutividade de modo rápido e a um custo bem menor.

Dentre os vários fatores que influenciam a condutividade hidráulica se destaca o conteúdo de água do solo (Libardi & Melo Filho, 2006). A relação entre condutividade e umidade apresenta elevada sensibilidade, de tal modo que apenas uma variação de 1 a 2% no conteúdo de água pode afetar o coeficiente de variação da condutividade em valores superiores a 170% (Falleiros et al., 1998); portanto, o desenvolvimento de modelos cada vez mais acurados continua sendo uma necessidade.

Em geral, a condutividade hidráulica saturada,  $K_0$  (na tensão  $h = 0$ ), é um valor medido e os valores da condutividade hidráulica não-saturada são calculados a partir dela, utilizando-se de vários procedimentos, em que a saturação ( $h = 0$ ) e seu conteúdo de água associado são conhecidos como ponto de referência (Dexter, 2004c).

Gardner (1974) criticou  $K_0$  como ponto de referência, sendo válida esta crítica, até hoje; comentou que  $K_0$  apresenta algumas vantagens mas que, em condições de campo, o solo se apresenta quase que freqüentemente como não-saturado; chegou à conclusão de que um conteúdo de água próximo à saturação seria melhor que o medido nas condições de saturação. Uma das complicações pelo uso da condutividade saturada como referência é que ela é freqüentemente governada por macroporos, tais como rachaduras ou canaletas contínuas, que são demasiadamente grandes para serem caracterizadas na curva de retenção da água do solo (Dexter, 2004c).

Dexter (2004a, 2004b, 2004c) propôs, em uma série de artigos, um novo parâmetro para avaliação da qualidade física do solo, denominado índice S, definido como sendo a declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão; este autor sugere que o índice S pode ser utilizado no cálculo da condutividade hidráulica não-saturada pelo fato de ser representativo da maior freqüência da distribuição do tamanho dos poros de um solo. Libardi (1999) já havia afirmado que o pico da curva diferencial da curva de retenção da água do solo encerra poros de raios mais freqüentes no solo.

Utilizando da teoria de Marshall (1958) para cálculo da permeabilidade, Dexter (2004c) desenvolveu um modelo para determinar a condutividade hidráulica em condições não-saturadas ( $K_i$ ) baseado no índice S e na tensão da água do solo no ponto de inflexão da curva de retenção ( $h_i$ ) e propôs este atributo como ponto de referência.

Objetivou-se, com este trabalho, verificar se o modelo proposto por Dexter (2004c) é adequado para determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos do cerrado brasileiro de diferentes classes texturais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado sobre 2166 amostras de solo, das quais constavam informações sobre textura, condutividade hidráulica saturada e retenção da água do solo registradas nos bancos de dados dos Laboratórios de Solo da Embrapa Arroz e Feijão e Embrapa Cerrados. Essas amostras abrangiam solos sob cerrado das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil. Apresentam-se, na Tabela 1 alguns dos municípios, com as respectivas coordenadas geográficas onde as amostras foram coletadas.

**Tabela 1.** Localização de alguns municípios nos quais as amostras de solo foram coletadas

Latitude	Longitude	Local	Município	UF
15° 13' 14,52" S	47° 42' 08,82" W	Fazenda Rio de Janeiro	Planaltina	GO
08° 26' 33,30" S	47° 40' 01,44" W	Aldeia Kraos-Kapev	Reserva Krahó	TO
16° 29' 30,73" S	49° 18' 01,26" W	Fazenda Capivara	Santo Antônio de Goiás	GO
11° 52' 49,32" S	45° 39' 09,12" W	Fazenda Mundo Novo	Barreiras	BA
10° 02' 10,60" S	49° 50' 55,60" W	Javaé#1-Floresta	Pium (Canguçu)	TO
02° 53' 48,40" S	59° 57' 06,48" W	UnB Ecologia	Flona Tapajós	AM
12° 24' 33,96" S	56° 10' 33,78" W	Fazenda V.R. Verde	Tapurah	MT
06° 33' 11,80" S	44° 11' 05,30" W	Fazenda Canto Grande	Pastos Bons	MA

Com o auxílio do programa Soil Water Retention Curve - SWRC (Dourado Neto et al., 2001), os dados de retenção da água do solo nas diferentes classes texturais estudadas, muito argilosa, argilosa, argilo-arenosa, franco-argilo-arenosa, franco/franco-arenosa e areia-franca/arenosa, foram ajustados às curvas, pelo modelo de Genuchten (1980), com a restrição de Mualem (1976), ou seja,  $m = 1 - 1/n$ .

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \left( 1 + (\alpha \cdot h)^{\frac{1}{1-m}} \right)^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (1)$$

em que  $\theta$ ,  $\theta_{\text{sat}}$  e  $\theta_{\text{res}}$  são, respectivamente, os conteúdos de água do solo correspondentes à tensão  $h$ , à saturação e à umidade residual, expressos em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ,  $h$  é a tensão matricial da água do solo, em cm,  $n$  e  $m$  são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste, e  $\alpha$  é um parâmetro expresso em  $\text{cm}^{-1}$ .

Determinou-se, com base nos parâmetros obtidos, para cada curva, o índice S, conforme preconizado por Dexter (2004a).

$$S = -\frac{1}{1-m} (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^{-(1+m)} \quad (2)$$

A permeabilidade do solo ( $K$ ), em  $\text{cm}^2$ , foi definida segundo Marshall (1958).

$$K = 2,75 \cdot 10^{-3} \frac{\varepsilon^2}{N^2} (h_1^{-2} + 3h_2^{-2} + 5h_3^{-2} + \dots + (2N-1)h_N^{-2}) \quad (3)$$

em que  $\varepsilon$  é a porosidade cheia d'água, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ,  $N$  o número que divide a porosidade em partes iguais e  $h_i$  as tensões responsáveis pela manutenção dos poros cheios de água, em  $\text{cm}$ .

Considerou-se, no cálculo da permeabilidade do solo, a porosidade cheia d'água a partir do conteúdo de água equivalente ao ponto de inflexão ( $\theta_i$ ), em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , até o conteúdo de água correspondente ao ponto de murcha permanente ( $\theta_{\text{pmp}}$ ),  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , dividindo-se esse intervalo de porosidade cheia d'água em 20 partes iguais ( $N$ ).

O conteúdo de água no ponto de inflexão da curva ( $\theta_i$ ) foi determinado por (Dexter, 2004a):

$$\theta_i = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (4)$$

O conteúdo de água no ponto de murcha permanente foi considerado como o correspondente à tensão matricial do solo de 15.292,5  $\text{cm}$ , obtido a partir da equação (1).

A condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva de retenção ( $K_i$ ), em  $\text{cm h}^{-1}$ , foi calculada pela multiplicação da permeabilidade ( $K$ ) pela fluidez ( $\rho g \mu^{-1}$ ) em que  $\rho$  é a massa específica da água, em  $\text{g cm}^{-3}$ ,  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $\text{cm s}^{-2}$ , e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água, em  $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$  (Prevedello, 1996); assim, ajustando-se as unidades para expressar  $K_i$  em  $\text{cm h}^{-1}$ , tem-se:  $K_i = 349663366,34 K$ .

A condutividade hidráulica  $K_i$  obtida desta forma foi correlacionada com a proposta por Dexter (2004c).

$$K_i = k \left(\frac{S}{h_i}\right)^2 \quad (5)$$

em que  $k$  é um coeficiente de proporcionalidade e  $h_i$  a tensão da água no ponto de inflexão da curva de retenção de água, em  $\text{cm}$ .

A tensão da água no ponto de inflexão da curva foi determinada pelo cálculo da derivada de segunda ordem da equação de Genuchten (1980), igualando-se esta derivada a zero, de acordo com os procedimentos de Dexter (2004a).

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

A condutividade hidráulica saturada ( $K_o$ ) medida em laboratório também foi correlacionada com  $K_i$  (Eq. 5).

Tendo em vista a condutividade hidráulica saturada como referência, a condutividade hidráulica relativa em uma tensão da água do solo,  $K_r(h)$ , é dada por:

$$K_r(h) = K(h)/K_o \quad (7)$$

Pelo modelo de Genuchten (1980), o qual associou o grau de saturação efetiva,  $\Theta = \Theta(h)$ , à teoria de Mualem (1976), esta relação pode ser expressa como:

$$K_r(h) = \frac{\left(1 - (\alpha h)^{n-1} \left(1 + (\alpha h)^n\right)^{-m}\right)^2}{\left(1 + (\alpha h)^n\right)^{m/2}} \quad (8)$$

em que o parâmetro  $m$  se situa no intervalo de 0 a 1.

Analogamente, considerando-se  $K_i$  como referência, tem-se:

$$R(h) = K(h)/K_i \quad (9)$$

A equação (9) pode ser reescrita como:

$$R(h) = \frac{K(h)/K_o}{K_i/K_o} = K_r(h)/K_r(i) \quad (10)$$

Assim, considerando-se a equação (8),  $R(h)$  pode ser calculado por:

$$R(h) = \frac{\left(1 - (\alpha h)^{n-1} \left(1 + (\alpha h)^n\right)^{-m}\right)^2 \left(1 + (\alpha h_i)^n\right)^{m/2}}{\left(1 - (\alpha h_i)^{n-1} \left(1 + (\alpha h_i)^n\right)^{-m}\right)^2 \left(1 + (\alpha h)^n\right)^{m/2}} \quad (11)$$

Desta maneira e se conhecendo o índice  $S$  e  $h_i$  e, portanto,  $K_i$  (Eq. 5), é possível determinar a condutividade hidráulica não-saturada em qualquer outra tensão.

$$K(h) = R(h) \cdot K_i \quad (12)$$

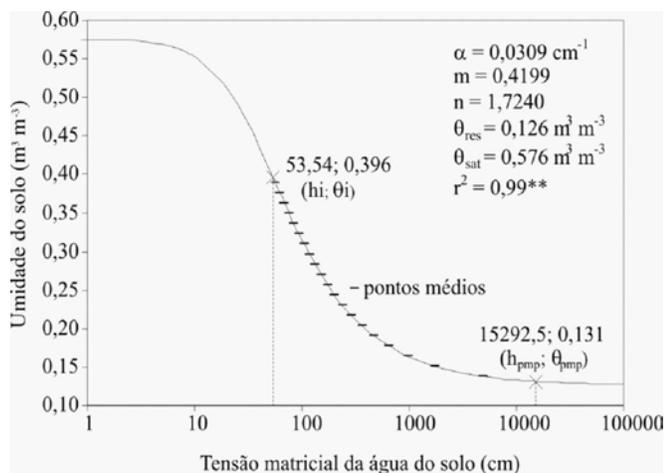
Utilizando-se esta equação se determinaram, com base em dados da literatura, as condutividades hidráulicas nas tensões de 5, 7, 10, 30, 60 e 100  $\text{kPa}$  correlacionando-as com os valores efetivamente medidos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se, na Figura 1, um exemplo da adaptação do procedimento de Marshall (1958) para cálculo da permeabilidade  $K$ , em que o intervalo de  $\theta_i$  até  $\theta_{\text{pmp}}$  foi dividido em  $N = 20$  partes iguais. Marshall (1958) dividiu, em 14 partes, o conteúdo de água, a partir da saturação ( $\theta_{\text{sat}}$ ). Dexter (2004c) testou as divisões  $N = 20, 40$  e  $80$  e notou que produziram alteração de apenas 1% nas estimativas da condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva.

O fato de se optar pelo conteúdo de água correspondente à tensão da água no ponto de murcha permanente, está de acordo com as observações de muitos autores, de que a água disponível para manejo de irrigação tem limite inferior neste ponto. Dexter (2004c) e Marshall (1958) utilizaram, como limite inferior, o conteúdo de água correspondente à umidade residual ( $\theta_{\text{res}}$ ), considerada aproximadamente igual a zero.

Para cada uma das classes texturais estudadas houve correlações positivas e altamente significativas entre  $K_i$  e  $(S/h_i)^2$ ; pode-se observar, nos resultados da Tabela 2, as equações



**Figura 1.** Exemplo de partição sugerida por Marshall (1958) de uma das curvas ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980), em que as cruces superior e inferior representam, respectivamente, ponto na inflexão (i) e ponto de murcha permanente (pmp), e os traços são pontos médios referentes a cada subárea unitária, obtida pela divisão do intervalo considerado por N = 20

**Tabela 2.** Equações de ajustes resultantes da correlação entre a condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva de retenção (Ki) e (S/hi)², para cada classe textural de solo¹

Classe textural	Equação	r²
Muito argilosa	$\log K_i = 0,9439 \log (S/h_i)^2 + 5,462$	0,94**
Argilosa	$\log K_i = 0,9585 \log (S/h_i)^2 + 5,573$	0,97**
Argilo-arenosa	$\log K_i = 0,9727 \log (S/h_i)^2 + 5,653$	0,97**
Franco-argilosa	$\log K_i = 0,9710 \log (S/h_i)^2 + 5,654$	0,98**
Franco-argilo-arenosa	$\log K_i = 0,9477 \log (S/h_i)^2 + 5,462$	0,97**
Franco-franco/arenosa	$\log K_i = 0,9761 \log (S/h_i)^2 + 5,680$	0,99**
Areia-franca/arenosa	$\log K_i = 0,8687 \log (S/h_i)^2 + 5,067$	0,91**

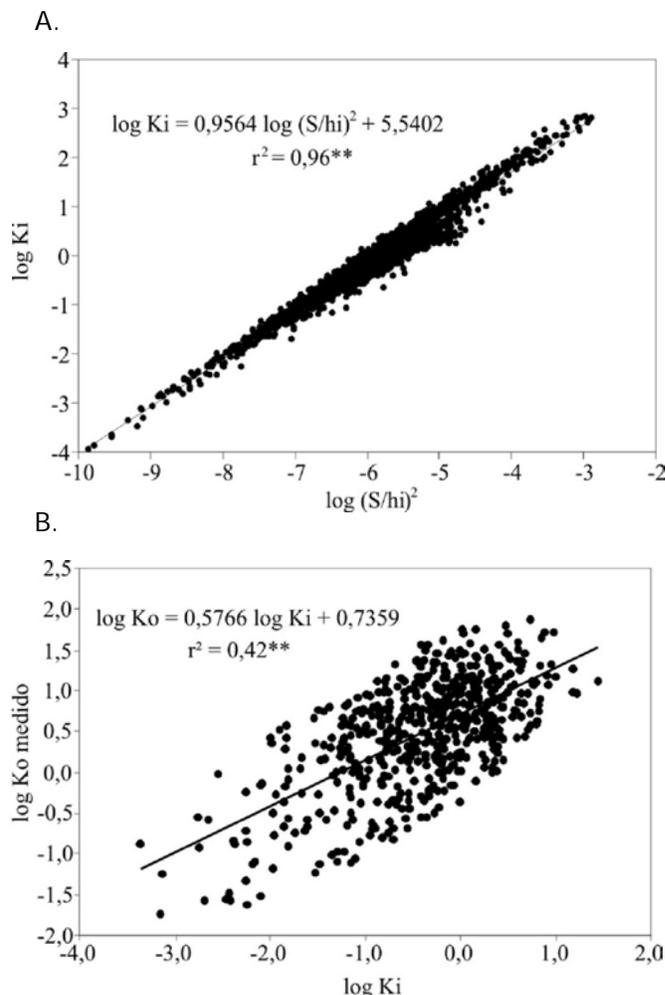
¹S = declividade da curva de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão; hi = tensão da água do solo no ponto de inflexão da curva de retenção

com os respectivos coeficientes de determinação (r²) e verificar que os coeficientes linear e angular são bastante semelhantes para as diferentes classes texturais, o que levou a gerar um modelo geral (Figura 2) para todas as classes estudadas, para fins de determinação da condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva de retenção da água do solo.

A equação de regressão da Figura 2 pode ser reescrita como:

$$K_i = 10^{5,5402} \left( (S/h_i)^2 \right)^{0,9564} \text{ ou } K_i = 10^{5,5402} (S/h_i)^{1,9128} \quad (13)$$

Considerando-se todas as classes texturais, a correlação entre Ki e (S/hi)² foi altamente significativa, cuja razão reside no fato de que, no ponto de inflexão da curva de retenção, os maiores poros cheios de água estão também no pico da distribuição de tamanho de poros; portanto, neste ponto eles dominam a condutividade hidráulica; além disso, tanto Ki como S dependem da estrutura do solo, a qual forma a base



**Figura 2.** (A) condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva de retenção (Ki) em função da relação (S/hi)²; (B) condutividade hidráulica saturada medida (Ko), considerando-se todas as classes texturais estudadas

comum para a maioria dos atributos físicos do solo (Dexter, 2004c).

A correlação entre a condutividade hidráulica saturada medida e a condutividade hidráulica não-saturada, determinada pela equação 5, foi positiva e significativa a 1% (Figura 2B).

A equação de regressão da Figura 2B pode ser reescrita como:

$$K_o = 10^{0,7359} K_i^{0,5766} \quad (14)$$

Embora a correlação exista, a variação nos valores de Ko é muito alta devido à ocorrência de características macroestruturais, fazendo com que esta correlação não seja de uso prático para a predição de Ko em solos individuais.

Tem-se, na Tabela 3, informações sobre alguns trabalhos selecionados para comparação entre os valores medidos da condutividade hidráulica não-saturada e os calculados pela equação proposta (Eq. 12).

Observa-se, na Tabela 4, que para todas as situações consideradas houve correlação altamente significativa entre a condutividade hidráulica medida e a calculada; entretanto, em

**Tabela 3.** Classe textural, profundidade de determinação da condutividade hidráulica não-saturada ( $z$ ) e parâmetros de ajuste da curva de retenção de água pelo modelo de van Genuchten (1980) de trabalhos utilizados para comparação com a condutividade hidráulica calculada pela equação proposta

Classe Textural <sup>1</sup>	$z$ (cm)	Parâmetros da curva de retenção de água				Referências
		$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	$\theta_{res}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_{sat}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	
Ag	10	0,0346	1,6189	0,171	0,375	Lacerda et al. (2005)
Ag	20	0,0164	2,0978	0,185	0,383	Lacerda et al. (2005)
Ag	0 - 20	0,0316	2,3136	0,250	0,668	Prevedello et al. (1994)
FAGAr	0 - 30	0,0051	2,2674	0,151	0,323	Stone & Silveira (1978)
Ar	0 - 20	0,0410	2,2554	0,057	0,380	Guerra et al. (2006)
ArF	20 - 40	0,0463	1,9546	0,073	0,228	Guerra et al. (2006)
FAR	40 - 60	0,0281	2,5479	0,079	0,330	Guerra et al. (2006)
FAR	60 - 80	0,0413	1,8540	0,067	0,330	Guerra et al. (2006)
FAR	80 - 100	0,0282	2,3451	0,077	0,330	Guerra et al. (2006)
FAR	100 - 110	0,0281	2,4897	0,085	0,330	Guerra et al. (2006)

<sup>1</sup>Ag - argilosa; FAGAr - franco-argilo-arenosa; AgAr - argilo-arenosa; Ar - arenosa; ArF - Areia Franca e FAR - Franco arenosa

**Tabela 4.** Resultado da correlação entre a condutividade medida e a calculada pela equação proposta

Referência	$z$ (cm)	Classe Textural <sup>1</sup>	Equação	r <sup>2</sup>
Lacerda et al. (2005)	10/20	Ag	$K(h)_{medida} = 0,4261 K(h)_{calculada}$	0,83**
Prevedello et al. (1994)	0-20	Ag	$K(h)_{medida} = 0,5020 K(h)_{calculada}$	0,99**
Stone & Silveira (1978)	0-30	FAGAr	$K(h)_{medida} = 0,9000 K(h)_{calculada}$	0,96**
Guerra et al. (2006)	0-40	Ar/ArF	$K(h)_{medida} = 0,3720 K(h)_{calculada}$	0,74**
Guerra et al. (2006)	40-110	FAR	$K(h)_{medida} = 0,2022 K(h)_{calculada}$	0,89**

<sup>1</sup>Ag - argilosa; FAGAr - franco-argilo-arenosa; AgAr - argilo-arenosa; Ar - arenosa; ArF - Areia Franca e FAR - Franco arenosa

todos os casos, o valor calculado foi maior que o medido, variando de 11 a 395%. Razões entre valores medidos e calculados da condutividade hidráulica tão grandes quanto  $10^3$  ou  $10^4$ , não são incomuns (Wagner et al., 2001) e qualquer método que tenha o potencial para reduzir essas variações vale a pena ser mais estudado. Assim, o método proposto usando-se o índice S e a tensão da água do solo no ponto de inflexão da curva de retenção, deve ser mais testado para determinar seu poder de predição.

## CONCLUSÕES

1. A condutividade hidráulica não-saturada no ponto de inflexão da curva de retenção da água do solo ( $K_i$ ) pode ser determinada a partir do índice S e da tensão matricial no ponto de inflexão dessa curva, independentemente da textura do solo.

2. Determinações de condutividade hidráulica não-saturada, com base em  $K_i$ , apresentaram altas correlações com valores medidos.

3. O uso do índice S e da tensão da água do solo no ponto de inflexão da curva de retenção na determinação da condutividade hidráulica não-saturada deve ser mais testado para determinar seu poder de predição.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao pesquisador da Embrapa Cerrados, Dr. Euzébio Medrado da Silva, pelas informações fornecidas sobre análises físico-hídricas de amostras de solos armazenadas no banco de dados dessa instituição.

## LITERATURA CITADA

- Dexter, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v.120, p.201-214, 2004a.
- Dexter, A. R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, till and hard-setting. *Geoderma*, v.120, p.215-225, 2004b.
- Dexter, A.R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, v.120, p.227-239, 2004c.
- Dourado Neto, D.; Nielsen, D. R.; Hopmans, J. W.; Reichardt, K.; Bacchi, O. O. S.; Lopes, P. P. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. *Soil Water Retention Curve, SWRC* (version 3,00 beta). Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.
- Falleiros, M. C.; Portezan, O.; Oliveira, J. C. M.; Bacchi, O. O. S.; Reichardt, K. Spatial and temporal variability of soil hydraulic conductivity in relation to soil water distribution, using an exponential model. *Soil & Tillage Research*, v.45, p.279-285, 1998.
- Gardner, W. R. The permeability problem. *Soil Science*, v.117, p.243-249, 1974.
- Guerra, H. O. C.; Lacerda, R. D. de; Barros Júnior, G. Condutividade hidráulica não saturada de um fragipânico coeso determinada pelo método do perfil instantâneo. *Principia*, v.10, n.14, p.48-55, 2006.
- Lacerda, R. D. de; Guerra, H. O. C.; Barros Júnior, G.; Cavalcanti, M. L. F.; Barros, A. D. Determinação da condutividade hidráulica de um solo argiloso pelo método do perfil instantâneo. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.5, p.1-7, 2005.
- Libardi, P. L. Dinâmica da água no solo. 2.ed. Piracicaba: o autor, 1999. 497p.
- Libardi, P. L.; Melo Filho, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.197-206, 2006.
- Marshall, T. J. A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of Soil Science*, v.9, p.2-8, 1958.
- Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v.12, p.513-522, 1976.
- Prevedello, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446p.

- Prevedello, C. L.; Reichardt, K.; Cordeiro, K. G.; Melo, E. F. G. Q.; Scheffer, M. Gradiente unitário do potencial hidráulico como fonte de erro na obtenção da condutividade hidráulica em solo não-saturado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.29, p.275-280, 1994.
- Stone, L. F.; Silveira, P. M. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.13, p.63-71, 1978.
- van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- Wagner, B.; Tarnawski, V.R.; Hennings, V.; Müller, U.; Wessolek, G.; Plagge, R. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, v.102, p.275-297, 2001.