

# Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho Amarelo, não-saturado, utilizando-se sonda de nêutrons

Laércio Alves Carvalho<sup>1</sup> e Paulo Leonel Libardi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Ciências Exatas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: pllibard@esalq.usp.br

**RESUMO.** O objetivo deste estudo foi determinar a condutividade hidráulica não-saturada, utilizando-se sonda de nêutrons, em um Latossolo Vermelho distrófico argissólico A moderado textura média. O estudo foi desenvolvido no campo experimental da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil. A parcela experimental apresentava comprimento de 45 m e largura de 15 m, na qual foram instalados 40 tubos de alumínio para acesso de uma sonda de nêutrons para medida do conteúdo da água no solo nas profundidades 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00 m e cálculo da armazenagem no perfil 0 - 1,00 m. Os tubos foram distribuídos na forma de grade de quatro colunas por dez linhas, com cada tubo distando 5 m de seu vizinho. As funções  $K(\theta)$  nos 40 pontos foram determinadas a partir das análises de regressão de  $\theta$  em função de  $\ln t$  e  $h_z$  em função de  $\ln t$ , durante o processo de redistribuição da água no solo. A sonda de nêutrons mostrou-se um equipamento eficiente na determinação do conteúdo de água no solo, no método do perfil instantâneo para determinação da função  $K(\theta)$  em solo homogêneo.

**Palavras-chave:** condutividade hidráulica, perfil instantâneo, dinâmica da água no solo.

**ABSTRACT.** *Unsaturated hydraulic conductivity of an Oxisol, using a neutron probe.*

The objective of this study was to determine the unsaturated hydraulic conductivity, using a neutron probe, of a clay sandy Oxisol. The study was carried out in the city of Piracicaba, State of São Paulo, Brazil (22°42' 43.3" S, 47° 37' 10.4" W, 546 m). The dimensions of the experimental plot were 45 m x 15 m, in which 40 aluminum tubes were installed in order to access a neutron probe to measure the soil water content at the depths of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 m and, then, calculate the soil water storage of the 0 - 1.0 m soil layer. The distribution of these tubes was made in grids of four columns by ten rows, in spacing of 5 x 5 m. The  $K(\theta)$  functions were determined in the 40 points from regression analyses of  $\theta$  as function  $\ln t$  and  $h_z$  as a function of  $\ln t$ , being  $K$  the hydraulic conductivity,  $\theta$  the volumetric soil water content,  $h_z$  the soil water storage in the 0 - Z m layer, and  $t$  the soil water redistribution time. The neutron probe proved to be an efficient equipment in determining soil water contents, in the instantaneous profile method for determination of the  $K(\theta)$  function in homogeneous soil.

**Key words:** hydraulic conductivity, instantaneous profile, soil water dynamics.

## Introdução

A disponibilidade de água no solo para as plantas afeta diretamente a produção de alimentos, portanto, o estudo do conteúdo e do movimento da água no solo faz-se importante para que se consiga a máxima capacidade de infiltração e armazenagem da água no solo proveniente das chuvas ou irrigação. Além disso, pode-se dizer que a quantificação do conteúdo de água no solo é de grande importância no monitoramento hídrico de áreas agrícolas, bem como em estudos que enfoquem a relação solo-água-planta.

Tanto para o consumo humano como para a produção agrícola, os recursos hídricos estão cada vez mais escassos. Portanto, tornou-se necessário

um planejamento mais eficaz do aproveitamento da água, com desenvolvimento de metodologias que permitam estimar volumes cada vez mais exatos para obtenção de ótima produção nos cultivos agrícolas (SYPERRECK et al., 2008).

O método do perfil instantâneo é um método de campo que foi inicialmente desenvolvido por Watson (1966), aperfeiçoado por Hillel et al. (1972) e simplificado por Libardi et al. (1980). Dentre as vantagens, pode-se citar a obtenção de medidas diretas no campo ou local de estudo, apresentando maior precisão dos valores de condutividade hidráulica, quando comparados com os de laboratório. Em contrapartida, é um método trabalhoso, com consumo elevado de tempo e,

principalmente, mão-de-obra, desde a instalação até a manutenção, o que pode ser dificultado ainda mais se o solo apresentar algum tipo de impedimento físico (JONG VAN LIER; LIBARDI, 1999).

Técnicas que envolvem a utilização da instrumentação agrônômica com vistas a determinar o conteúdo de água no solo são de grande importância para a pesquisa científica. Independentemente da técnica utilizada, é importante que, na determinação da função  $K(\theta)$ , por exemplo, o conteúdo de água no solo à base de volume seja determinado de forma precisa e, de preferência, que haja facilidade na sua obtenção (TEIXEIRA et al., 2005). Segundo Souza e Gomes (2008) um balanço hídrico irrigacionista, está intimamente relacionada aos parâmetros climáticos (ET<sub>o</sub>, ET<sub>c</sub> e P) e físico-hídricos do solo.

Existem métodos diretos e indiretos para a determinação do conteúdo de água no solo, os quais apresentam vantagens e limitações. A utilização de sonda de nêutrons é um método indireto que se destaca por permitir a aferição do conteúdo de água no solo com o mínimo de alteração no perfil, e a qualquer momento, de forma rápida e prática. A sonda de nêutrons consiste basicamente de uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos, um detector de nêutrons lentos e um pré-amplificador. A calibração da sonda de nêutrons consiste em obter a relação entre a leitura (cpm) e o conteúdo de água do solo ( $\theta$ ). Para a realização de uma boa calibração, devem-se tomar amostras nos mesmos pontos e profundidades de leitura com a sonda. As medidas do conteúdo de água no solo são feitas pelo método clássico de gravimetria. É um procedimento aparentemente simples, que pode apresentar dificuldades dependendo do desenho do experimento e das propriedades do perfil do solo.

Santos et al. (1999) testaram uma metodologia simplificada, que utiliza somente pontos extremos do conteúdo de água do solo (úmido e seco) e encontraram boa estimativa do conteúdo de água no solo, obtendo maior rapidez e simplicidade, comparado com outros métodos que utilizam todos os pontos de conteúdo de água do solo para a calibração.

Outro aspecto importante a ser considerado na utilização da sonda de nêutrons é a sua esfera de influência, que varia em função do conteúdo de água no solo. Para cada conteúdo de água no solo, a sonda amostra diferentes volumes de solo e, como o número de nêutrons lentos detectados pelo sistema de contagem varia em função do conteúdo de água, a esfera de influência será maior em solos secos do que em solos mais úmidos. Esse fato poderá acentuar os problemas causados pela utilização da

sonda de nêutrons em camadas superficiais do solo, ocorrendo a fuga de nêutrons para a atmosfera.

Considerando todos os aspectos citados anteriormente, desenvolveu-se um estudo com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica de cinco profundidades em 40 pontos amostrais de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, por meio de sonda de nêutrons.

## Material e métodos

O local da instalação deste estudo foi o campo experimental do Departamento de Produção vegetal, Campus da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil. Suas coordenadas geográficas são: 22° 42' 43,3" de latitude Sul, 47° 37' 10,4" de longitude Oeste e 546 m de altitude. O relevo local é plano com declive na área experimental menor que 0,01 m m<sup>-1</sup>. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (Typic Hapludox) (EMBRAPA, 1999).

A parcela experimental apresentava comprimento de 45 m e largura de 15 m, na qual foram instalados 40 tubos de alumínio para acesso de uma sonda de nêutrons para medida do conteúdo da água no solo. O tubo de alumínio (para acesso da sonda de nêutrons) tinha 2,0 m de comprimento, 45 mm de diâmetro interno e 1,5 mm de espessura de parede; a instalação desses tubos foi realizada com auxílio de um trado tipo holandês e, por ocasião da instalação, amostras de solo foram coletadas a cada 0,20 m de profundidade para posterior caracterização física. As medidas com a sonda foram feitas desde 0,20 até 1,0 m de profundidade do solo em cada tubo, para a determinação da armazenagem da água no perfil 0,20 - 1,0 m. A distribuição dos tubos foi feita na forma de grade de quatro colunas por 10 linhas, com cada tubo distando 5 m de seu vizinho.

Para a avaliação da armazenagem de água no solo, utilizou-se do método da moderação de nêutrons por meio de uma sonda de nêutrons com fonte de Amerício-Berílio (50mCi), modelo 503 Hydroprobe da CPN Corporation. Com a sonda de nêutrons, foram feitas leituras às profundidades de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,00 m. Sempre antes e depois das leituras, realizava-se uma contagem padrão com a sonda dentro da blindagem. Essa contagem servia para calcular a contagem relativa, isto é, relação entre a contagem atual e a padrão.

Para a calibração da sonda, coletaram-se amostras deformadas de solo por meio de um trado tipo holandês para determinação do conteúdo de água no solo à base de massa, em pontos previamente escolhidos de acordo com a contagem da sonda;

foram escolhidos os que apresentavam maiores e menores leituras. As leituras tiveram início antes da inundação do solo até o momento em que se observou estabilidade do fluxo de água no solo; obtiveram-se valores do conteúdo de água no solo desde os mais baixos aos mais altos. Correlacionando esses dados com os respectivos dados de contagem relativa da data e do ponto amostrado, foi obtida uma equação de correlação:

$$U = 8,55488CR + 0,5299 \quad (r^2 = 0,71) \quad (1)$$

em que:

$U$  é o conteúdo de água no solo à base de massa e  $CR$  é a contagem relativa. Por meio dessa equação, foram obtidos valores de conteúdo de água no solo à base de massa para as profundidades de medida.

No caso do presente trabalho, como os valores de conteúdo de água no solo medidos foram à base de massa ( $U$ ) e a armazenagem de água no perfil de solo  $0-L$  m de profundidade,  $h_L$ , foi calculada pela integral

$$h_L = \int_0^L \alpha I Z \rightarrow m \quad (2)$$

em que:

$\theta$  é o conteúdo de água a base de volume, os valores de  $U$  foram convertidos em valores de  $\theta$  pela equação

$$\theta = \rho / \rho_a \quad (3)$$

sendo  $\rho$  a densidade do solo e  $\rho_a$  a densidade da água ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ). A densidade do solo foi determinada em cada um dos 40 pontos, a partir de amostras de solo com estrutura indeformada obtidas no final do experimento por meio de um extrator tipo Uhland.

Para aplicar o método do perfil instantâneo no campo, foi utilizada uma estrutura de chapa galvanizada (2 mm de espessura), de 0,50 m de altura e 3,00 m de diâmetro, que foi introduzida no solo até 0,30 m de profundidade a fim de evitar qualquer fluxo de água lateralmente quando da inundação e durante a redistribuição.

Anteriormente à inundação e início das leituras, a área destinada ao experimento foi devidamente preparada de forma a ficar relativamente plana e livre de vegetação.

A saturação do perfil do solo foi iniciada colocando água na parcela, por meio de uma mangueira munida de registro, a partir de um

caminhão pipa, até que se umedecesse o máximo possível a camada de 0 – 1,0 m do solo. Terminada essa operação, a parcela foi coberta com uma capa plástica, para evitar qualquer fluxo de água através da superfície, e capim seco para diminuir o aquecimento.

O momento da colocação do plástico foi considerado o tempo zero de redistribuição. Depois das leituras da sonda de nêutrons em  $t = 0$ , durante os primeiros dias, essas leituras foram feitas a cada seis horas e, a partir daí, diariamente, até quando a drenagem praticamente cessou. De posse dos resultados, foi aplicado o método do perfil instantâneo para determinação da condutividade hidráulica do solo.

### Resultados e discussão

Obtidos os dados de conteúdo de água no solo à base de volume para os 40 pontos e as cinco profundidades estudadas, elaboraram-se os gráficos de conteúdo de água no solo à base de volume em função do tempo. Os dados de conteúdo de água à base de volume em função do tempo de redistribuição foram ajustados por meio de uma equação de primeiro grau ( $\theta = a \cdot \ln t + b$ ). Para todas as profundidades, obteve-se um coeficiente de determinação  $R^2$  muito próximo da unidade, o que demonstra o excelente ajuste dos dados (última coluna das Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5).

Angelotti Netto e Fernandes (2005), estudando a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo, conseguiram bons ajustes nos gráficos de conteúdo de água no solo e armazenagem em função do tempo. Além disso, os resultados mostraram maior proximidade entre os perfis de conteúdo de água, em função do tempo, no solo em pousio do que no solo cultivado, especialmente próximo à saturação. Reichardt et al. (2004), medindo a condutividade hidráulica do solo no campo, também obtiveram ajustes lineares no gráfico de ajuste  $\theta$  versus  $\ln t$ , com valores de  $R^2 > 0,98$ .

Igualmente, Carvalho et al. (2007) obtiveram, em seu trabalho, coeficientes de determinação ( $R^2$ ) próximos da unidade em gráficos de ajuste do conteúdo de água no solo em função do tempo; diferentemente, porém, deste estudo, a função que melhor descreveu os dados foi uma de terceiro grau. Esse fato pode ser explicado pela diferença de metodologia adotada, pois, em seu trabalho, Carvalho et al. (2007) utilizou tensiômetros e obteve os valores de conteúdo de água no solo à base de volume a partir

do ajuste da curva de retenção da água no solo para cada profundidade estudada, com o que, pela maior precisão dos tensiômetros, foi possível observar melhor variação dos valores de conteúdo de água no solo durante a redistribuição da água.

**Tabela 1.** Valores de  $\theta_0$ ,  $\ln K_0$  e  $\gamma$  da profundidade 20 cm e os respectivos  $r^2$  dos gráficos  $h_L$  versus  $\ln t$  e  $\theta$  versus  $\ln t$ .

Pontos	$\theta_0$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\ln K_0$ (mm h)	$\gamma \left( \frac{1}{a} \right)$	$r^2$ $h_L$ versus $\ln t$	$r^2$ $\theta$ versus $\ln t$
Ponto 1	0,30	0,89	60,24	0,96	0,96
Ponto 2	0,41	1,56	32,79	0,96	0,96
Ponto 3	0,44	1,55	28,99	0,97	0,97
Ponto 4	0,46	1,93	26,74	0,95	0,95
Ponto 5	0,42	2,13	42,02	0,91	0,91
Ponto 6	0,36	0,98	43,10	0,92	0,92
Ponto 7	0,37	1,46	69,44	0,93	0,93
Ponto 8	0,43	0,89	59,52	0,96	0,96
Ponto 9	0,42	0,69	61,73	0,96	0,96
Ponto 10	0,42	0,82	60,98	0,96	0,96
Ponto 11	0,31	0,89	59,35	0,96	0,96
Ponto 12	0,45	0,70	36,63	0,88	0,88
Ponto 13	0,40	0,89	60,02	0,96	0,96
Ponto 14	0,30	0,89	60,24	0,96	0,96
Ponto 15	0,40	1,39	29,24	0,93	0,93
Ponto 16	0,45	1,43	32,79	0,96	0,96
Ponto 17	0,46	1,55	28,99	0,97	0,97
Ponto 18	0,42	1,26	57,14	0,96	0,96
Ponto 19	0,43	1,50	60,24	0,96	0,96
Ponto 20	0,46	0,98	43,10	0,92	0,92
Ponto 21	0,39	0,72	49,26	0,96	0,96
Ponto 22	0,33	0,86	60,24	0,96	0,96
Ponto 23	0,47	0,75	38,91	0,89	0,89
Ponto 24	0,37	1,39	39,22	0,97	0,97
Ponto 25	0,40	0,82	61,35	0,96	0,96
Ponto 26	0,41	0,90	58,82	0,96	0,96
Ponto 27	0,38	1,27	57,14	0,96	0,96
Ponto 28	0,38	1,42	51,55	0,95	0,95
Ponto 29	0,35	0,96	58,48	0,96	0,96
Ponto 30	0,43	1,56	32,79	0,96	0,96
Ponto 31	0,34	0,81	50,76	0,94	0,94
Ponto 32	0,39	1,55	28,99	0,97	0,97
Ponto 33	0,39	0,79	45,87	0,92	0,92
Ponto 34	0,41	0,75	38,91	0,89	0,89
Ponto 35	0,40	1,53	49,26	0,95	0,95
Ponto 36	0,32	1,85	59,52	0,96	0,96
Ponto 37	0,36	1,91	42,02	0,91	0,91
Ponto 38	0,35	0,98	43,10	0,92	0,92
Ponto 39	0,36	1,16	56,18	0,96	0,96
Ponto 40	0,35	1,56	32,79	0,96	0,96

A partir dos dados de conteúdo de água no solo à base de volume, foram calculados os valores de armazenagem da água no solo, os quais, pelos ajustes do conteúdo de água em função de  $\ln t$  obtidos para todas as profundidades dos 40 pontos, só poderiam ajustar-se, também, a uma linha reta com o logaritmo do tempo de redistribuição ( $h_L = A \ln t + B$ ). É importante esclarecer que a armazenagem se refere à média aritmética dos conteúdos de água medidos na camada de 0 a L multiplicada por L; por exemplo, neste trabalho, a armazenagem de  $Z = 0$  a  $Z = 0,4$  m é igual à média aritmética das umidades em  $z = 0,20$  m e  $z = 0,40$  m multiplicada pela profundidade  $z = 0,40$ , para cada tempo de medida. Esses resultados

são similares aos de Reichardt et al. (2004), os quais obtiveram ajustes lineares no gráfico que relaciona  $h_L$  versus  $\ln t$ , com valores de  $R^2 > 0,90$ . Neste trabalho, os autores desenvolvem uma nova equação que pode ser aplicada para determinação da condutividade hidráulica de campo, pois a mesma inclui quantitativamente o efeito do gradiente hidráulico no cálculo da condutividade.

**Tabela 2.** Valores de  $\theta_0$ ,  $\ln K_0$  e  $\gamma$  da profundidade 40 cm e os respectivos  $r^2$  dos gráficos  $h_L$  versus  $\ln t$  e  $\theta$  versus  $\ln t$ .

Pontos	$\theta_0$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\ln K_0$ (mm h)	$\gamma \left( \frac{1}{a} \right)$	$r^2$ $h_L$ versus $\ln t$	$r^2$ $\theta$ versus $\ln t$
Ponto 1	0,28	1,13	83,33	0,97	0,96
Ponto 2	0,38	2,05	38,46	0,96	0,96
Ponto 3	0,41	4,37	33,33	0,97	0,96
Ponto 4	0,43	2,48	30,40	0,95	0,95
Ponto 5	0,39	2,82	52,08	0,9	0,88
Ponto 6	0,33	1,33	53,48	0,93	0,94
Ponto 7	0,34	2,10	102,04	0,95	0,95
Ponto 8	0,40	1,36	52,63	0,97	0,96
Ponto 9	0,39	1,11	86,21	0,97	0,96
Ponto 10	0,39	1,18	76,92	0,97	0,96
Ponto 11	0,32	0,95	56,18	0,95	0,92
Ponto 12	0,31	1,73	51,02	0,89	0,89
Ponto 13	0,35	1,69	55,56	0,96	0,96
Ponto 14	0,31	1,06	65,79	0,96	0,95
Ponto 15	0,35	1,80	58,82	0,95	0,96
Ponto 16	0,42	2,05	38,46	0,96	0,96
Ponto 17	0,43	2,05	33,33	0,97	0,96
Ponto 18	0,39	1,65	76,92	0,98	0,98
Ponto 19	0,38	1,13	83,33	0,97	0,96
Ponto 20	0,43	1,34	53,48	0,93	0,94
Ponto 21	0,36	0,94	63,29	0,95	0,94
Ponto 22	0,30	1,14	79,37	0,97	0,96
Ponto 23	0,44	1,07	47,17	0,89	0,89
Ponto 24	0,34	1,83	47,62	0,97	0,97
Ponto 25	0,40	1,83	29,67	0,87	0,8
Ponto 26	0,35	1,27	75,76	0,97	0,96
Ponto 27	0,34	1,50	78,13	0,98	0,97
Ponto 28	0,33	1,35	66,67	0,96	0,96
Ponto 29	0,33	1,62	76,34	0,98	0,97
Ponto 30	0,40	2,05	38,46	0,96	0,96
Ponto 31	0,31	1,09	66,23	0,95	0,95
Ponto 32	0,36	2,05	33,33	0,97	0,96
Ponto 33	0,31	1,16	69,93	0,94	0,95
Ponto 34	0,38	1,07	47,17	0,89	0,89
Ponto 35	0,35	2,14	59,88	0,96	0,95
Ponto 36	0,28	0,95	76,92	0,97	0,96
Ponto 37	0,33	2,46	52,08	0,9	0,87
Ponto 38	0,32	1,34	53,48	0,93	0,94
Ponto 39	0,32	1,44	72,46	0,97	0,96
Ponto 40	0,32	2,05	38,46	0,96	0,96

Maciel Netto et al. (2000) também obtiveram os valores de densidade de fluxo, para diferentes tempos, por meio de cálculo da armazenagem de água acumulada compreendida entre a superfície do solo e a profundidade de interesse  $L$ , integrando-se os perfis de conteúdo de água no solo e traçando-se a curva  $h_L(z,t)$ ; o ajuste, porém, foi feito com uma função tripla exponencial. Um total de 200 perfis foi ajustado e para todos eles o  $R^2$  foi acima de 0,80, indicando que a equação de primeiro grau descreveu adequadamente o fenômeno, à semelhança do solo deste trabalho.

**Tabela 3.** Valores de  $\theta_0$ ,  $\ln K_0$  e  $\gamma$  da profundidade 60 cm e os respectivos  $r^2$  dos gráficos  $h_L$  versus  $\ln t$  e  $\theta$  versus  $\ln t$ .

Pontos	$\theta_0$ ( $m^3m^{-3}$ )	$\ln K_0$ (mm h)	$\gamma \left( \frac{1}{a} \right)$	$r^2$ $h_L$ versus $\ln t$	$r^2$ $\theta$ versus $\ln t$
Ponto 1	0,29	1,39	77,52	0,96	0,94
Ponto 2	0,39	2,38	37,31	0,96	0,96
Ponto 3	0,42	2,39	32,36	0,96	0,96
Ponto 4	0,44	2,82	29,59	0,96	0,96
Ponto 5	0,40	3,04	49,75	0,89	0,89
Ponto 6	0,34	1,65	51,02	0,94	0,94
Ponto 7	0,34	1,60	93,46	0,96	0,96
Ponto 8	0,41	1,39	76,92	0,97	0,94
Ponto 9	0,40	1,51	64,10	0,97	0,94
Ponto 10	0,40	2,14	71,94	0,97	0,94
Ponto 11	0,33	1,31	53,48	0,94	0,92
Ponto 12	0,34	1,36	48,78	0,89	0,88
Ponto 13	0,36	2,03	52,91	0,97	0,96
Ponto 14	0,32	1,38	62,11	0,96	0,94
Ponto 15	0,36	1,68	84,10	0,96	0,94
Ponto 16	0,43	2,38	37,31	0,96	0,96
Ponto 17	0,44	2,39	32,36	0,97	0,96
Ponto 18	0,40	1,89	71,94	0,98	0,96
Ponto 19	0,39	1,48	67,57	0,97	0,94
Ponto 20	0,44	1,65	51,02	0,94	0,94
Ponto 21	0,37	1,26	59,88	0,95	0,92
Ponto 22	0,31	1,41	74,07	0,97	0,94
Ponto 23	0,45	1,41	45,25	0,89	0,88
Ponto 24	0,35	2,14	45,87	0,97	0,96
Ponto 25	0,41	2,31	28,90	0,85	0,82
Ponto 26	0,36	1,55	70,92	0,97	0,95
Ponto 27	0,35	1,73	73,53	0,98	0,96
Ponto 28	0,34	1,34	90,09	0,96	0,94
Ponto 29	0,34	1,86	71,94	0,98	0,96
Ponto 30	0,41	2,38	37,31	0,96	0,96
Ponto 31	0,32	1,38	62,50	0,95	0,95
Ponto 32	0,37	2,39	32,36	0,97	0,96
Ponto 33	0,32	1,42	65,79	0,94	0,94
Ponto 34	0,39	1,41	45,25	0,89	0,88
Ponto 35	0,36	0,10	57,14	0,96	0,95
Ponto 36	0,29	1,53	45,05	0,97	0,94
Ponto 37	0,34	2,73	49,75	0,89	0,88
Ponto 38	0,33	1,65	51,02	0,94	0,94
Ponto 39	0,33	1,71	68,03	0,97	0,95
Ponto 40	0,33	2,38	37,31	0,96	0,96

**Tabela 4.** Valores de  $\theta_0$ ,  $\ln K_0$  e  $\gamma$  da profundidade 80 cm e os respectivos  $r^2$  dos gráficos  $h_L$  versus  $\ln t$  e  $\theta$  versus  $\ln t$ .

Pontos	$\theta_0$ ( $m^3m^{-3}$ )	$\ln K_0$ (mm h)	$\gamma \left( \frac{1}{a} \right)$	$r^2$ $h_L$ versus $\ln t$	$r^2$ $\theta$ versus $\ln t$
Ponto 1	0,26	1,30	93,46	0,97	0,94
Ponto 2	0,36	2,52	40,49	0,96	0,96
Ponto 3	0,39	2,54	34,84	0,97	0,96
Ponto 4	0,41	3,01	31,65	0,95	0,95
Ponto 5	0,36	3,18	55,87	0,89	0,89
Ponto 6	0,31	1,97	57,47	0,94	0,93
Ponto 7	0,31	1,50	117,65	0,97	0,95
Ponto 8	0,38	1,31	92,59	0,97	0,94
Ponto 9	0,36	1,31	92,17	0,97	0,94
Ponto 10	0,36	1,31	91,74	0,97	0,94
Ponto 11	0,29	1,33	60,61	0,94	0,9
Ponto 12	0,32	2,16	54,64	0,88	0,85
Ponto 13	0,32	2,14	59,88	0,97	0,97
Ponto 14	0,28	1,35	71,94	0,96	0,93
Ponto 15	0,33	1,61	90,91	0,96	0,94
Ponto 16	0,39	2,52	40,49	0,96	0,96
Ponto 17	0,40	2,54	34,84	0,97	0,96
Ponto 18	0,37	1,90	85,47	0,98	0,97
Ponto 19	0,36	2,08	63,29	0,97	0,94
Ponto 20	0,40	1,68	57,47	0,94	0,93
Ponto 21	0,34	1,20	68,97	0,94	0,89
Ponto 22	0,27	1,67	60,24	0,97	0,94
Ponto 23	0,41	1,43	50,25	0,89	0,85
Ponto 24	0,32	2,24	50,76	0,96	0,97
Ponto 25	0,37	2,55	30,86	0,83	0,8
Ponto 26	0,32	1,50	84,03	0,97	0,95
Ponto 27	0,31	1,71	86,96	0,98	0,96
Ponto 28	0,31	1,34	93,46	0,96	0,94
Ponto 29	0,31	1,88	84,75	0,98	0,97
Ponto 30	0,37	2,52	40,49	0,96	0,96
Ponto 31	0,28	1,33	72,46	0,95	0,95
Ponto 32	0,33	2,54	34,84	0,97	0,96
Ponto 33	0,28	1,36	76,92	0,94	0,92
Ponto 34	0,35	1,43	50,25	0,89	0,85
Ponto 35	0,32	2,53	64,94	0,96	0,96
Ponto 36	0,25	1,77	94,34	0,97	0,94
Ponto 37	0,30	2,90	55,87	0,89	0,88
Ponto 38	0,29	1,68	57,47	0,94	0,93
Ponto 39	0,29	1,71	80,00	0,97	0,96
Ponto 40	0,29	2,52	40,49	0,96	0,96

Neste trabalho, as curvas da armazenagem de água no solo, em função do tempo de redistribuição, seguiram a mesma tendência em todas as profundidades. Isto pode estar relacionado à influência da estrutura e composição dos materiais em termos de matéria orgânica e argila, que determinam alterações na quantidade e distribuição de poros. Os parâmetros da função  $K(\theta)$  (Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5) foram determinados, primeiramente, com a confecção dos gráficos de  $\theta$  versus  $\ln t$  e  $h$  versus  $\ln t$ , a partir dos resultados obtidos nos diversos tempos de redistribuição da água no solo. A partir dos ajustes dos gráficos de  $\theta$  versus  $\ln t$  e  $h$  versus  $\ln t$  e de toda simplificação proposta ao método de Libardi et al. (1980), foi possível determinar os valores dos parâmetros da equação  $K(\theta)$ , da seguinte forma: o  $\theta_0$  foi obtido por meio da conversão da leitura da sonda de nêutrons em conteúdo de água no solo à base de volume, porém foi considerado o conteúdo de água no solo no tempo

1 hora de redistribuição. O  $\gamma$  foi obtido a partir da relação  $1/a$ , proveniente da equação de ajuste  $\theta$  versus  $\ln t$ , ou, mais precisamente,  $\theta = a \cdot \ln t + b$  (LIBARDI et al., 1980). Por último, o  $K_0$  foi obtido pela equação:

$$k_0 = \frac{A}{e^{\frac{\theta_0 - b}{a}}} \quad (4)$$

em que:

$A$  é o coeficiente angular da equação de ajuste  $h_L$  versus  $\ln t$ .

Neste trabalho, mesmo considerando o gradiente unitário proposto por Libardi et al. (1980), muitos autores discutem os métodos de determinação da condutividade hidráulica do solo não-saturado, pelos possíveis erros que podem surgir no valor final da condutividade em função do valor do gradiente. Bacchi e Reichardt (1993) observaram que, na prática, não existem problemas em utilizar o

gradiente unitário, porém destacaram que deve ser aplicado, de preferência, em solos homogêneos. A variação no valor do gradiente foi observada por Hurtado et al. (2005) que obtiveram, em ensaio com perfil instantâneo, gradiente de potencial total variando desde valores em torno de 0, no início do experimento, a valores superiores a 10. Segundo os autores, esse resultado era esperado em função de o experimento ser realizado em condições de evaporação e equilíbrio dinâmico, em que a diminuição do conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica é compensada pelo aumento do gradiente de  $\phi$ .

**Tabela 5.** Valores de  $\theta_0$ ,  $\ln K_\theta$  e  $\gamma$  da profundidade 100 cm e os respectivos  $r^2$  dos gráficos  $h_L$  versus  $\ln t$  e  $\theta$  versus  $\ln t$ .

Pontos	$\theta_0$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\ln K_\theta$ (mm h)	$\gamma \left( \frac{1}{a} \right)$	$r^2$ $h_L$ versus $\ln t$	$r^2$ $\theta$ versus $\ln t$
Ponto 1	0,27	1,31	85,47	0,96	0,89
Ponto 2	0,37	2,62	39,06	0,96	0,95
Ponto 3	0,40	2,67	33,67	0,96	0,95
Ponto 4	0,42	3,13	30,67	0,96	0,95
Ponto 5	0,37	2,99	52,91	0,89	0,88
Ponto 6	0,32	1,77	54,35	0,94	0,93
Ponto 7	0,32	1,54	105,26	0,97	0,9
Ponto 8	0,39	1,33	84,03	0,96	0,89
Ponto 9	0,38	1,82	50,00	0,96	0,89
Ponto 10	0,38	1,38	80,65	0,96	0,89
Ponto 11	0,30	1,45	57,14	0,93	0,88
Ponto 12	0,33	2,03	51,81	0,88	0,85
Ponto 13	0,34	2,21	56,50	0,97	0,96
Ponto 14	0,29	1,43	67,11	0,95	0,9
Ponto 15	0,34	1,73	72,99	0,96	0,89
Ponto 16	0,41	2,62	39,06	0,96	0,95
Ponto 17	0,42	2,67	33,67	0,96	0,94
Ponto 18	0,38	1,89	78,74	0,98	0,93
Ponto 19	0,37	1,74	60,24	0,96	0,89
Ponto 20	0,42	1,77	54,35	0,94	0,93
Ponto 21	0,35	1,28	64,52	0,93	0,86
Ponto 22	0,29	1,45	87,72	0,96	0,89
Ponto 23	0,43	1,56	47,85	0,88	0,86
Ponto 24	0,33	2,32	48,31	0,97	0,94
Ponto 25	0,38	2,70	29,94	0,83	0,82
Ponto 26	0,33	1,54	77,52	0,97	0,92
Ponto 27	0,33	1,71	80,65	0,98	0,92
Ponto 28	0,32	1,41	81,97	0,96	0,89
Ponto 29	0,32	2,20	75,19	0,98	0,93
Ponto 30	0,39	2,62	39,06	0,96	0,95
Ponto 31	0,29	1,39	67,57	0,95	0,9
Ponto 32	0,35	2,67	33,67	0,96	0,94
Ponto 33	0,30	1,40	71,43	0,94	0,89
Ponto 34	0,37	1,56	47,85	0,88	0,85
Ponto 35	0,34	2,54	61,35	0,97	0,94
Ponto 36	0,26	0,91	70,42	0,96	0,89
Ponto 37	0,32	2,93	52,91	0,89	0,88
Ponto 38	0,31	1,77	54,35	0,94	0,94
Ponto 39	0,31	1,73	74,07	0,97	0,92
Ponto 40	0,30	2,62	39,06	0,96	0,95

Vale ressaltar que, independentemente do método utilizado, os valores obtidos de  $K(\theta)$  são afetados pelos erros inerentes à determinação das densidades de fluxo, dos conteúdos de água e dos potenciais, obtidos com base nos ajustes dos conteúdos de água e dos potenciais totais. Deve-se prestar atenção, ainda, na transição entre a fase

rápida e a fase lenta da drenagem, procurando ajustar os dados de maneira coerente para não influenciar o resultado final.

## Conclusão

A sonda de nêutrons mostrou-se eficiente na determinação do conteúdo de água no perfil do solo, para determinação da condutividade hidráulica em condições de não-saturação em solo homogêneo, pelo método do perfil instantâneo.

## Referências

- ANGELOTTI NETTO, A. A.; FERNANDES, E. J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 8, p. 797-802, 2005.
- BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Sobre métodos simplificados de determinação da condutividade hidráulica do solo. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 2, p. 326-328, 1993.
- CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L.; CRUZ, A. C. R.; ROCHA, G. C. Caracterização hidráulica de um latossolo vermelho associada a caracterização pedológica do perfil. **Ciência Rural**, v. 37, n.4, p. 1008-1013, 2007.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 1999.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V. D.; STILIANOV, Y. Procedure and test of na internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, v. 114, n. 5, p. 395-400, 1972.
- HURTADO, A. L. B.; CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. J. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 301-307, 2005.
- 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**, v. 23, n. 4, p. 1005-1014, 1999.
- LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Simple field methods for estimating hydraulic conductivity. **Soil Science Society America Journal**, v. 44, n. 1, p. 3-7, 1980.
- MACIEL NETTO, A.; ANTONINO, A. C. D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G.; DALL'OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um podzólico amarelo da Zona da Mata do Norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1221-1228, 2000.

- REICHARDT, K.; TIMM, L. C.; BACCHI, O. O. S.; OLIVEIRA, J. C. M.; DOURADO-NETO, D. A parameterised equation to estimate soil hydraulic conductivity in the field. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, n. 3, p. 283-287, 2004.
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R.; VILAS BOAS, M. A. Calibração simplificada de sonda de nêutrons para a determinação do conteúdo de água no solo. **Revista de Agricultura**, v. 74, n. 2, p. 209-216, 1999.
- SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.
- SYPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 5, p. 603-609, 2008.
- TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 161-168, 2005.
- WATSON, K. K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, v. 2, p. 709-715, 1966.

*Received on July 4, 2007.*

*Accepted on February 22, 2008.*

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.