

## Espacialização da condutividade hidráulica medida no campo<sup>(1)</sup>.

**Alexsandro dos Santos Brito<sup>(2)</sup>; Paulo Leonel Libardi<sup>(3)</sup>; Jaedson Cláudio Anunciato Mota<sup>(4)</sup>; Sergio Oliveira Moraes<sup>(5)</sup>.**

<sup>(1)</sup> Trabalho executado com recursos do CNPq (Edital Universal 477215/2007-6).

<sup>(2)</sup> Professor Efetivo; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – Campus Guanambi; Guanambi, Bahia; alexsandro.brito@guanambi.ifbaiano.edu.br; <sup>(3)</sup> Professor Titular; Universidade de São Paulo – ESALQ; <sup>(4)</sup> Professor Adjunto; Universidade Federal do Ceará; <sup>(5)</sup> Professor Doutor. Universidade de São Paulo – ESALQ.

**RESUMO:** O conhecimento da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo é muito importante, uma vez que está relacionada com a qualidade estrutural do solo, o conteúdo de água e transporte de água até a camada de desenvolvimento efetivo do sistema radicular das plantas. Diante disso, o objetivo do trabalho foi quantificar a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho Amarelo, medida no campo e avaliar a espacialização. A área experimental possui 1.500 m<sup>2</sup>, na qual foi feita uma malha regular de pontos amostrais, distanciados de 5 x 5 m, num total de 60 repetições. A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada para a profundidade de 0,8 m. O conteúdo e a armazenagem de água no solo foi medida nas profundidades de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 m em função do tempo de redistribuição, por meio de uma sonda de nêutrons. O gradiente de potencial total, na profundidade de 0,8 m, foi determinado por tensiômetros instalados a 0,75 e 0,85 m de profundidade. Observa-se que os menores valores de condutividade hidráulica do solo saturado localizam-se nas porções mais altas da área, enquanto os maiores valores foram encontrados nas porções mais baixas. O alcance foi de 41 m e o IDE foi de 0,56, considerado moderado.

**Termos de indexação:** Variabilidade espacial.

### INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade dinâmica, uma vez que o solo como meio poroso pode ter sua estrutura modificada por processos naturais, como é o caso do adensamento, e por processos antropogênicos, além da dependência de outros atributos físicos e físico-químicos, que interferem na magnitude do transporte de água no perfil do solo.

A relação da condutividade hidráulica com o conteúdo de água no solo é exponencial, fazendo com que uma pequena variação do conteúdo de água implique grande variação da condutividade hidráulica. Por outro lado, essa relação exponencial torna a condutividade hidráulica um atributo bastante sensível para o monitoramento da qualidade física dos solos (Cadima et al., 1980). Na

equação da condutividade hidráulica que exprime essa relação exponencial (Libardi et al., 1980), um dos parâmetros de ajuste é a condutividade hidráulica do solo saturado, a qual é essencial nas análises e modelagens dos fluxos de água e transporte de elementos químicos no solo (Iversen et al., 2001).

A participação da condutividade hidráulica como uma propriedade dinâmica na equação de Darcy-Buckingham revela a sua importância para estudos de processos, como é o caso da drenagem interna ou ascensão capilar, lixiviação de fertilizantes e poluentes. Esses processos são importantes para o adequado manejo do solo e da cultura (Brito et al., 2009), da irrigação e no monitoramento de uma possível poluição do lençol freático.

Quanto à variabilidade espacial da condutividade hidráulica, existem muitos trabalhos que utilizaram metodologias próprias para a medição da condutividade hidráulica (Cadima et al., 1980; Falleiros et al., 1998; Scherpinski et al., 2010). Entretanto, o método do perfil instantâneo, realizado nas condições de campo, é mais apropriado para esse estudo, uma vez que engloba uma amostra muito maior, tornando a medida mais representativa do solo avaliado.

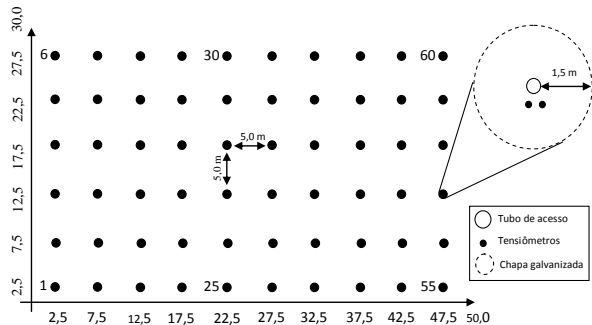
Dada a importância da avaliação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica para os processos dinâmicos da água ou solução do solo nos sistemas agrícolas, o objetivo do trabalho foi quantificar a condutividade hidráulica medida no campo e avaliar a espacialização.

### MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, localizada no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil. As coordenadas geográficas da área são 22°42'43”S, 47°37'10”W e 591 m de altitude. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

O croqui da área experimental é apresentado na Figura 1, com a disposição dos 60 tubos de acesso à sonda de nêutrons instalados na área, distanciados de 5 m x 5 m, e dos tensiômetros (às profundidades de 0,75 e 0,85 m), localizados a 0,50

m dos tubos de acesso.



**Figura 1** – Croqui da área experimental com a ordem dos pontos amostrais indicada pela numeração de alguns pontos

### Calibração da sonda de nêutrons

A avaliação do conteúdo de água nas profundidades de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 m em função do tempo de redistribuição da água no solo foi feita pelo método da moderação de nêutrons (método não destrutivo), utilizando uma sonda de nêutrons, modelo 503 Hydropobe da CPN Corporation. Para tanto, é necessário que se faça uma calibração para o solo em estudo, uma vez que cada solo possui características morfológicas e constituição específicas.

Para tanto, realizou-se uma amostragem nas profundidades de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 m dos 60 pontos em diferentes datas, registrando a contagem da sonda, com tempo de leitura de 30 segundos, para seleção de pontos com contagens distintas, uma vez que a contagem é diretamente proporcional ao conteúdo de água no solo e o objetivo foi de ter uma equação (regressão linear) que abrangesse a maior faixa de conteúdo de água possível.

Para a realização desse procedimento, utilizou-se o Programa Estatístico R e o Pacote GeoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001), função “points”, sempre tomando a contagem da profundidade de 0,4 m como variável resposta e demais contagens como covariáveis, para elaborar o mapa de contagens dos 60 pontos, categorizadas em cinco níveis (subfunção “pt.div=quint”). Após seleção dos pontos, procedeu-se à coleta de amostras deformadas e de novos registros de contagem com a sonda de nêutrons, tendo-se o cuidado de registrar a contagem da sonda na posição padrão (em cima da própria caixa da sonda) e no ponto amostral em três repetições, tornando possível o cálculo da contagem relativa - CR (razão entre a

contagem no ponto amostral e a contagem no estado padrão) com maior exatidão.

As equações de calibração para as referidas profundidades foram respectivamente: a)  $\theta=0,1354CR_m-0,0036$  ( $R^2=0,75$ ); b)  $\theta=0,1456CR_m-0,0304$  ( $R^2=0,74$ ); c)  $\theta=0,159CR_m-0,0408$  ( $R^2=0,78$ ); d)  $\theta=0,157CR_m-0,0346$  ( $R^2=0,86$ ).

### Tratamentos e amostragens

A determinação da condutividade hidráulica do solo saturado a 0,80 m de profundidade foi realizada pelo método do perfil instantâneo, descrito por Watson (1966) e desenvolvido em condições de campo por Hillel (1972) e Libardi et al. (1980). Para execução do estudo proposto, foram realizados 60 ensaios deste método, conforme croqui apresentado na Figura 1. A coluna de solo delimitada no campo teve três metros de diâmetro e sua superfície lateral foi revestida por uma chapa galvanizada (2 mm de espessura) até a profundidade de 0,40 m, com o objetivo de se obter apenas fluxo vertical, sobretudo na porção central da coluna.

As 60 repetições foram saturadas até alcançar o maior conteúdo de água no solo, indicado pela maior contagem detectada pela sonda de nêutrons e pelo potencial mátrico zero, medido nos tensiômetros a 0,75 e 0,85 m de profundidade.

Com a colocação da primeira lona plástica, momento em que a lâminha de água infiltrava no solo, foram realizadas leituras com sonda de nêutrons e dos tensiômetros a cada hora, no primeiro dia, após o início do processo de redistribuição da água no perfil do solo e, do segundo dia em diante, foram realizadas leituras com menor frequência. As leituras com a sonda foram realizadas nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m, com a finalidade de calcular a armazenagem de água na camada de 0 - 0,80 m do solo e as dos tensiômetros para determinação do gradiente de potencial total na profundidade de 0,8 m.

Para a medida do conteúdo de água e, conseqüentemente, da armazenagem de água no solo, foram feitas três repetições de contagem com a sonda de nêutrons em cada profundidade e em função do tempo de redistribuição da água no solo, sempre realizando-se a leitura da contagem na posição padrão.

Para o cálculo da condutividade hidráulica do solo em cada parcela experimental, foi utilizado o procedimento proposto por Hillel et al. (1972), para o cálculo da função  $K(\theta)$  pela equação

$$K(\theta)_z = \frac{-\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dZ}{\frac{\partial \phi_t}{\partial z}_z} \quad (1)$$

Dessa maneira, foi possível escrever a equação de condutividade hidráulica para a profundidade de 0,80 m, conforme Libardi et al. (1980):

$$K(\theta) = K_0 \times e^{\gamma(\theta - \theta_0)}, \quad (2)$$

na qual  $K_0$  e  $\theta_0$  são a condutividade hidráulica e o conteúdo de água volumétrico do solo no tempo zero de redistribuição, respectivamente. O  $\gamma$  é o coeficiente angular determinado pela regressão linear de  $\ln K$  em função do conteúdo de água.

### Análise estatística

As análises foram feitas utilizando o Programa Estatístico R com seus pacotes MASS (análise exploratória não espacial), GeoR (análise exploratória espacial, modelagem de parâmetros e da estrutura de correlação espacial e krigagem), AKIMA (interpolação de covariáveis na malha de predição). O editor de código R utilizado foi o Tinn-R.

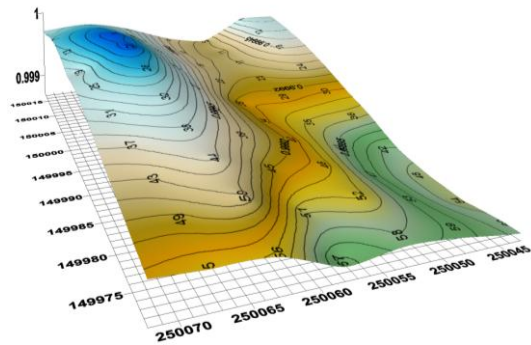
A análise dos dados consistiu de uma análise exploratória ou não espacial e de uma análise espacial, utilizando ferramentas geoestatísticas. A análise exploratória foi feita utilizando métodos da estatística clássica, como a) aplicação de teste de distribuição de probabilidade dos dados (Shapiro-Wilk) e construção de gráficos quantis-quantis ("qqplot"), com o objetivo de confirmar se os dados seguem uma distribuição normal, b) estudo da relação dos dados em relação às coordenadas vertical e horizontal da área experimental e c) gráficos de caixa (boxplot) para estudar a dispersão e a presença de valores discrepantes (outliers).

A análise espacial foi feita, inicialmente, utilizando a função "points" do pacote GeoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLER, 2001) para verificar a disposição dos dados nos seus locais de medida e o semivariograma experimental, como ferramenta para investigar a dependência espacial. Após essas análises iniciais, fez-se o ajuste do modelo, com estimativa dos parâmetros e estudo da necessidade de transformação dos dados ou utilização de uma covariável que possibilitasse uma maior discriminação da estrutura espacial.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

O relevo da área experimental apesar de possuir baixa declividade, apresenta pequenas oscilações, as quais criam depressões em algumas porções da

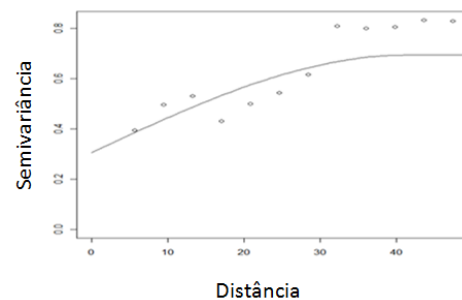
área. Para a verificação desse aspecto, foi elaborado um mapa planialtimétrico (Figura 2), utilizando uma cota relativa à maior cota da área (591,72 m). A diferença entre a maior e a menor cota é de 0,765 m.



**Figura 2** – Mapa planialtimétrico da área experimental, representado por cotas altimétricas relativas à maior cota, com a distribuição dos pontos amostrais.

A análise exploratória e a espacialização da condutividade hidráulica do solo saturado foram realizadas com dados transformados em logaritmo natural, a qual evidenciou-se a normalidade dos dados. Além disso, evidenciou-se a presença de um valor discrepante (valor de  $\ln K_0$  maior que 8,5  $\text{mm dia}^{-1}$ , correspondente a  $K_0=6.595,28 \text{ mm dia}^{-1}$ ), o qual foi estimado no ponto 23.

Para os dados de condutividade hidráulica do solo saturado, o modelo que melhor se ajustou foi o esférico (Figura 3).

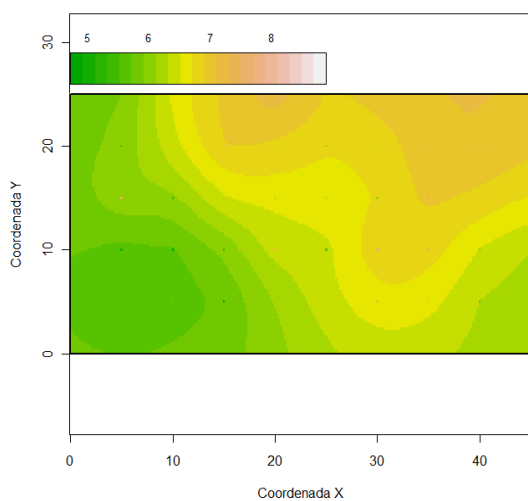


**Figura 3** – Semivariogramas experimental e ajustado da condutividade hidráulica do solo saturado ( $\ln K_0$ ), determinada pelo método do perfil instantâneo.

O alcance prático para esse modelo foi de 41 m. O efeito pepita foi de 0,30 e o patamar foi 0,69. Para testar o nível de dependência espacial, calculou-se o índice de dependência espacial proposto por Zimback (2001), sendo que índices menores ou iguais a 0,25 são considerados fracos, entre 0,25 e 0,75 tidos como moderados e acima de 0,75 considerados como fortes. Dessa forma, o IDE para

a condutividade hidráulica do solo saturado foi de 0,56, classificada, portanto, como moderada. Valor do IDE semelhante (IDE=0,65) foi encontrado em um Latossolo Vermelho distroférico localizado na cidade de Cascavel – PR e com relevo suave ondulado (SCHERPINSKI et al., 2010).

Com o modelo ajustado, criou-se uma malha de predição sobre a área experimental (predição a cada 0,2 m, totalizando 48.576 pontos), para o qual se procedeu à realização da krigagem, feita como krigagem ordinária (Figura 4).



**Figura 4** – Mapa de predição (krigagem) da condutividade hidráulica do solo saturado ( $\ln K_0$ ), medida em  $\text{mm dia}^{-1}$ .

Observa-se que os menores valores de condutividade hidráulica do solo saturado localizam-se nas porções mais altas da área experimental (pontos 1, 2, 5, 6, 7, 8, 13, 14, 19, 20, 25, 26, 49 e 50), enquanto os maiores valores foram encontrados nas porções mais baixas. Valores elevados de condutividade hidráulica estão relacionados com a presença de mesoporos criados por raízes e/ou minhocas (Dexter et al., 2004), entretanto, nesse estudo observou-se apenas uma fraca relação direta entre esses atributos do solo.

Correlações mais pronunciadas foram encontradas com relação à cota altimétrica, densidade do solo na profundidade de 0,8 m e a porosidade total na profundidade de 0,8 m, sendo que com a cota altimétrica e a densidade do solo a relação foi inversa e direta com a porosidade total. É muito provável que o maior conteúdo de argila, presente nas porções mais baixas da área, tenha contribuído para uma melhor estruturação do solo e maiores valores de  $K_0$ .

## CONCLUSÕES

Os valores mais elevados de condutividade hidráulica do solo saturado foram encontrados nas porções da área experimental com menores cotas altimétricas, o que indica uma influência da morfologia do terreno na estrutura do solo, principalmente porque nessas porções há uma maior quantidade de argila. O alcance foi de 41 m e IDE (=0,56) foi moderado.

## REFERÊNCIAS

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; GHIBERTO, P.J. Water Balance Components in Soils Cropped to Sugarcane, with and without Nitrogen Fertilization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 2, p. 295-303, 2009.

CADIMA, A.Z.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo vermelho-amarelo, textura média, no campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.4, n.2, p.63-66, 1980.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research*, v. 79, n. 2, p. 185-189, 2004.

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 and Tillage Research*, v. 45, p. 279-285, 1998.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.K.; STILIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, v.114, p.395-400, 1972.

IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil Science*, v. 166, n. 10, p. 643-659, 2001.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, n. 1, p. 3-7, 1980.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. GeoR: a package for geostatistical analysis. *R-NEWS*, v. 1; p.15-18, 2001.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M.A.; BOAS, M.A.V.; SAMPALIO, S.C.; JOHANN, J.A. Spatial variability of hydraulic conductivity and water infiltration in the soil. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. 2001. 144p. Tese de Livre-Docência, Universidade Paulista "Júlio de Mesquita", Faculdade de Ciências Agrárias, Botucatu, 2001.