

INFLUÊNCIA DA PEDOFORMA NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR¹

Zigomar Menezes de Souza; José Marques Júnior; Gener Tadeu Pereira; Luis Fernando Moreira

Departamento de Solos e Adubos, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, zigomar@fcav.unesp.br

1 RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado, resistência do solo à penetração e teor de água de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana de açúcar, utilizando-se métodos da estatística clássica, análises geoestatística e técnicas de interpolação de dados, com a finalidade de observar padrões de ocorrência destes atributos na paisagem. Foram feitas amostragens de solo nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m, nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 10 m, perfazendo um total de 100 pontos. Os valores do coeficiente de variação para os dados apresentaram-se desde baixos (teor de água do solo), alto (resistência do solo à penetração) e muito alto (condutividade hidráulica do solo saturado). Observou-se a ocorrência de dependência espacial de todas as variáveis estudadas, com os maiores alcances na profundidade de 0,2-0,4 m. As variáveis condutividade hidráulica do solo saturado e teor de água do solo apresentaram grau moderado de dependência espacial, a resistência à penetração teve forte grau de dependência espacial. Pequenas variações nas formas do relevo condicionam variabilidade diferenciada para atributos físicos do solo.

UNITERMOS: geoestatística, krigagem, condutividade hidráulica do solo saturado, resistência do solo à penetração.

**SOUZA, Z. M. de; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F.
INFLUENCE OF THE LANDSCAPE IN THE SPATIAL VARIABILITY OF THE
HYDRAULIC CONDUCTIVITY, PENETRATION RESISTANCE AND SOIL MOISTURE IN
THE SUGAR CANE CROP**

2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate spatial variability of saturated hydraulic conductivity, soil resistance to penetration and soil moisture in an area where sugarcane was planted under conventional tillage, using classic statistical methods, geostatistical analyses and data interpolation techniques, to assess occurrence patterns of these characteristics in the landscape. Soil

¹ Extraído da tese de Doutorado do primeiro autor, projeto financiado pela FAPESP.
Recebido em 16/10/2003 e aprovado para publicação em 04/12/2003

was sampled depths of 0.0-0.2 m and 0.2-0.4 m, collected in intersections of a regular grid, with intervals of 10 m, in a total of 100 sampling points. Variation Coefficient (VC) were low for soil moisture, high soil for penetration resistance and very high for saturated hydraulic conductivity. All variables showed spatial dependence and the largest ones for depth of 0.2-0.4 m. Saturated hydraulic conductivity and soil moisture presented moderate spatial dependence, soil penetration resistance showed strong spatial dependence. Small variations in the landscape forms can define different spatial variability found for the physical characteristics of the soil.

KEYWORDS: geostatistics, kriging, saturated hydraulic conductivity, soil penetration resistance.

3 INTRODUÇÃO

A qualidade estrutural do solo tem sido associada às condições físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular, aeração, infiltração e movimento de água no perfil do solo. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil sofreu rápido processo de modernização, onde são adotadas técnicas de cultivo e colheita intensamente mecanizadas que promovem alterações no comportamento das propriedades físicas e hídricas do solo e na produtividade dos canaviais. As principais alterações são evidenciadas pelo aumento da densidade do solo e como consequência o aumento da resistência do solo à penetração radicular e, redução da aeração e modificações na disponibilidade e fluxo de água (MEEK et al., 1992; UTSET & CID, 2001; ROBAINA & SEIJAS, 2002).

Pesquisas recentes tem demonstrado que a paisagem pode auxiliar no estudo de propriedades físicas do solo (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000; MOHANTY & MOUSLI, 2000; PACHEPSKY et al., 2001); e posições da paisagem são importante para o estudo do movimento de água ao longo do perfil (BATHKE & CASSEL, 1991; RAWLS & PACHEPSKY, 2002). MARQUES JÚNIOR & LEPSCH (2000), afirmam que a utilização da altitude, declividade e formas da paisagem do solo para delinear zonas de manejo e estudo da variabilidade espacial para atributos físicos em diferentes tipos de solos, são de extrema importância. Para DANIELS & HAMMER (1992), dentre os processos da vertente, o que mais afetam as propriedades do solo é a

quantidade, fluxo e distribuição sazonal da água. Estes autores afirmam que o fluxo de água, superficial e subsuperficial ao longo da vertente, é a principal geradora de variabilidade espacial.

A variabilidade espacial de propriedades físicas e movimento de água do solo têm sido amplamente pesquisada por vários autores (TRANGMAR et al., 1985; DIIWU et al., 1998; POULSEN et al., 2001; UTSET & CID, 2001). Os componentes do ciclo hidrológico influencia diretamente ou indiretamente na variabilidade espacial de propriedades do solo, como também outros processos que afetam a erosão e a qualidade da água. Portanto, em estudos agronômicos do sistema solo-água-planta devem considerar a variabilidade dos solos, pois diferentes taxas nas quais os fatores e processos de formação do solo atuaram ao longo do tempo imprimiram-lhe variabilidades naturais, esta somada ao manejo realizado pelo homem, acentua a variabilidade dos atributos do solo (TRANGMAR et al., 1985).

Ao analisar os dados mediante os métodos estatísticos clássicos são ignorados as consequências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios de amostras. Alternativamente, os métodos geoestatístico estão sendo utilizados cada vez com mais frequência, tanto para as análises da dependência espacial como para a interpolação através da krigagem (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985; PHYLLIPS et al., 1992; SOUZA et al., 2001). A geoestatística permite determinar se um atributo apresenta ou não estrutura espacial, uma vez conhecido o

modelo da dependência espacial é possível mapear a área estudada.

Considerando que o perfil e as curvaturas do terreno condicionam a variabilidade espacial diferenciada dos atributos físicos e hídricos do solo, esse estudo foi realizado com o objetivo de estudar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado, resistência do solo à penetração e teor de água de um Latossolo Vermelho eutrófico, sob cultivo de cana-de-açúcar, em áreas com variações da pedofoma.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se no nordeste do estado de São Paulo, no município de Guariba (SP). As coordenadas geográficas são 21° 19' de latitude sul e 48° 13' de longitude oeste, com altitude média de 640 m acima do nível do mar. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico com inverno seco (Cwa), com precipitação

média de 1400 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifolia e mata ciliar.

O relevo é predominantemente suave ondulado com declividades médias variando de 3 a 8 %. A área experimental está sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de trinta anos. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico, textura muito argilosa (LVef), segundo EMBRAPA (1999).

De acordo com o modelo de Troeh (1965), classificou-se a curvatura e o perfil das formas do terreno no terço inferior da encosta, em dois compartimentos (I e II), como mostrado na Figura 1. No compartimento I a forma do relevo é basicamente linear e o compartimento II apresenta curvaturas côncavas e convexas. O solo foi amostrado nos pontos de cruzamento de uma malha com intervalos regulares de 10 m, na linha de tráfego, nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Os pontos da malha de dimensão 100 x 100 m, totalizando 100 pontos, em uma área de 1 ha, foram georeferenciados.

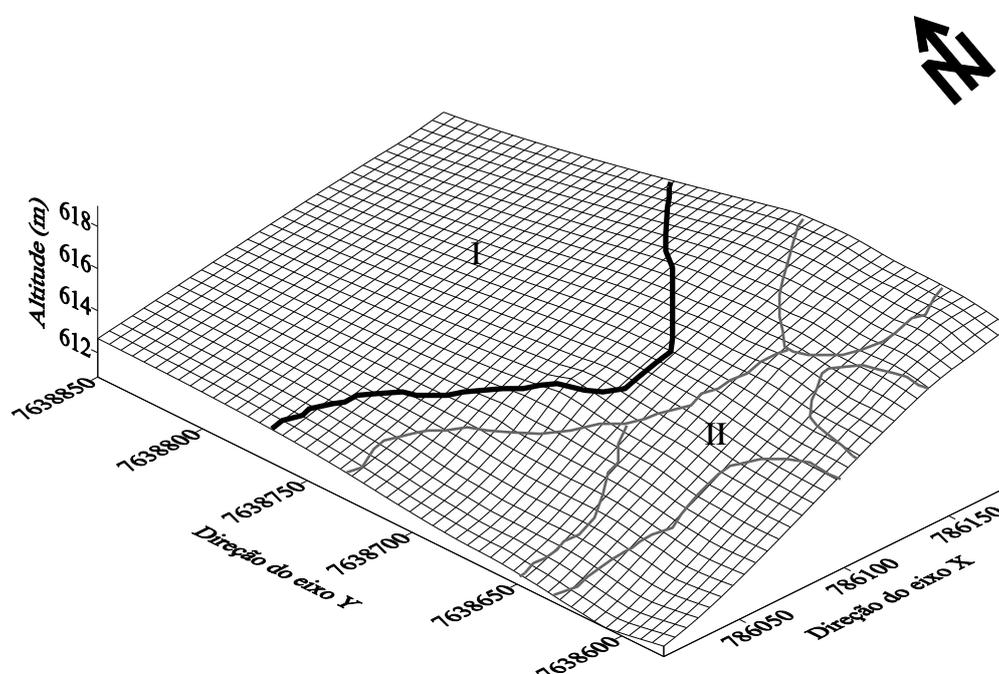


Figura 1. Mapa da área de estudo, com identificação dos compartimentos (I e II).

A resistência do solo à penetração foi determinada, utilizando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de cone de 30° e os resultados transformados segundo STOLF (1991); o teor de água do solo, à base de massa, foi obtido pelo método da pesagem (EMBRAPA, 1997). A condutividade hidráulica do solo saturado no campo foi avaliada através do permeâmetro de Guelph (VIEIRA, 1995-1998), cujo funcionamento é baseado no princípio de Mariotte. Mediu-se a taxa constante de infiltração e se calculou a condutividade hidráulica do solo saturado no campo (Kfs) segundo Reynolds & Elrick (1985). Feitas às medições, estas foram ajustadas ao sistema de equações propostos por Vieira et al. (1988), as quais são:

$$Q_1 = \left(\frac{2\pi \cdot H_1^2}{C_1} + \pi \cdot a^2 \right) \cdot Kfs + \left(\frac{2\pi \cdot H_1}{C_1} \right) \cdot \phi_m \quad (1)$$

$$Q_2 = \left(\frac{2\pi \cdot H_2^2}{C_2} + \pi \cdot a^2 \right) \cdot Kfs + \left(\frac{2\pi \cdot H_2}{C_2} \right) \cdot \phi_m \quad (2)$$

Em que: Kfs (cm s⁻¹) é a condutividade hidráulica do solo saturado no campo, ϕ_m (cm² s⁻¹) é o potencial matricial do fluxo, Q (cm³ cm⁻³) é o fluxo constante, H (cm) é a carga hidráulica, C (cm cm) é um fator de geometria, e a (cm) é o raio do orifício onde as medições foram feitas. A solução das equações Q₁ e Q₂ gera valores de Kfs em cm h⁻¹.

A variabilidade dos atributos do solo foi, primeiramente, avaliada pela análise exploratória dos dados, calculando-se a média, mediana, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e de curtose. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov utilizando o software SAS, (1995).

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983; JOURNAL & HUIJBREGTS, 1991). Com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca, utilizou-se a semivariância, a qual é estimada por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

em que, N(h) é o número de pares de pontos medidos das variáveis regionalizadas Z(x_i), Z(x_i + h), separadas por um vetor h. O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ contra os valores correspondentes de h, é denominado semivariograma. Do ajuste de um modelo matemático aos valores estimados de $\hat{\gamma}(h)$ são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C₀; variância estrutural, C₁; patamar, C₀ + C₁; e o alcance, a). O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância onde a curva estabiliza sobre um valor constante; o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, considerando o limite da dependência espacial da grandeza medida. Foram ajustados aos dados os seguintes modelos: (a) esférico (Esf), $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 [1,5 (h/a) - 0,5 (h/a)^3]$ para 0 < h < a e $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1$ para h > a; (b) exponencial (Exp), $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h/a)]$ para 0 < h < d, onde d é a distância máxima na qual o semivariograma é definido; (c) gaussiano (Gau), $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h^2/a^2)]$. A razão entre a variância estrutural e o patamar C₁/(C₁+C₀) expressa em porcentagem, permitiu a classificação do grau de dependência espacial, a qual segundo Robertson (1998) é considerada fraca se esta razão for ≤ 25 %, moderada quando esta razão está entre 25 e 75 %, e forte se a razão for > 75 %. Segundo TRANGMAR et al. (1985), esta razão permite a comparação entre os atributos do solo.

Para determinar a existência ou não da dependência espacial, utilizou-se o exame de semivariogramas, através do programa GS⁺ (ROBERTSON, 1998). Quando obteve-se mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor R² (coeficiente de determinação) e menor SQR (soma de quadrados do resíduo). Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis foi utilizado o programa Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1999).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov SAS (1995), indicaram normalidade para a resistência do solo à penetração e teor de água do solo nas profundidades estudadas (Tabela 1). A variável condutividade hidráulica do solo saturado não apresentou distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov, porém os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas. Segundo Isaaks & Srivastava (1989) mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, o que não foi observado, ou seja, ocorre a estacionaridade necessária ao uso da geoestatística. No entanto, em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste de uma distribuição teórica é apenas aproximado (WARRICK & NIELSEN, 1980).

Adotando o critério de classificação para CV proposto por Warrick & Nielsen (1980) para avaliar a dispersão dos dados (Tabela 1), seus valores revelaram-se baixos para a variável umidade do solo nas duas profundidades estudadas,

concordando com os resultados obtidos por (LIBARDI et al., 1986; SOUZA et al., 2001). A variável resistência do solo à penetração apresentou CV alto o mesmo foi observado por Souza et al. (2001), Utset & Cid (2001) e Abreu et al. (2003). Para a variável condutividade hidráulica do solo saturado observou-se um CV muito alto, concordando com os resultados obtidos por Warrick & Nielsen (1980), Phillips et al. (1992), Diiwu et al. (1998) e Abreu et al. (2003).

Vários autores têm adotado essas classes de CV como complemento aos estudos de avaliação da variabilidade espacial do solo (LIBARDI et al., 1986; MACEDO et al., 1998; SALVIANO et al., 1998; SOUZA et al., 2001). Apesar deste parâmetro permitir comparar a variabilidade entre amostras com unidades diferentes, o seu emprego não deve ser generalizado e restrito, devendo-se apreciar esses resultados segundo as finalidades a que se destina o trabalho (OLIVEIRA & MENK, 1974). Porém, o entendimento da dependência espacial desses atributos deve ser feito com o auxílio da geoestatística, que quando associadas aos atributos da paisagem, oferece subsídios para transferência de tecnologia.

Tabela 1. Estatística descritiva para as variáveis condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}), resistência do solo à penetração (MPa) e teor de água do solo (kg kg^{-1}) nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m.

| Atributos do solo | Análise exploratória | | | | | Teste de normalidade |
|---|----------------------|---------|-------|------------|---------|----------------------|
| | Média | Mediana | CV | Assimetria | Curtose | d^1 |
| 0,0-0,2 m | | | | | | |
| Condutividade hidráulica do solo saturado | 30,11 | 24,17 | 68,73 | 0,36 | -1,21 | 0,20 |
| Resistência do solo à penetração | 4,40 | 4,54 | 38,73 | -0,20 | -0,88 | 0,07* |
| Teor de água do solo | 21,52 | 21,50 | 8,68 | 0,01 | -0,71 | 0,05* |
| 0,2-0,4 m | | | | | | |
| Condutividade hidráulica do solo saturado | 23,48 | 29,37 | 61,20 | 0,53 | -0,08 | 0,17 |
| Resistência do solo à penetração | 5,11 | 5,06 | 28,12 | 0,30 | -0,19 | 0,06* |
| Teor de água do solo | 23,26 | 23,52 | 9,94 | -0,10 | -0,93 | 0,07* |

¹ d = estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, (*) significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados da análise geoestatística encontram-se no Tabela 2 e Figura 2. Todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial nas duas profundidades estudadas. O modelo esférico ajustou-se para todas as variáveis estudadas nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m, com coeficiente de determinação (R^2) acima de 80 % na profundidade de 0,0-0,2 m e acima de 85 % na profundidade de 0,2-0,4 m. Estes resultados estão de acordo com várias pesquisas que indicam o modelo esférico como o de maior ocorrência para os atributos do solo (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985; BERTOLANI & VIEIRA, 2001).

O alcance relacionado em ordem crescente para a profundidade de 0,0-0,2 m teve os seguintes valores para as variáveis: condutividade hidráulica do solo saturado, 16 m; resistência do solo à penetração, 20,4 m e teor de

água do solo, 72,9 m. Para a profundidade de 0,2-0,4 m, no entanto, o alcance apresentou os seguintes valores: condutividade hidráulica do solo saturado, 18 m; resistência do solo à penetração, 25 m e teor de água do solo, 77,2 m. Na profundidade de 0,2-0,4 m os alcances foram maiores em relação à profundidade de 0,0-0,2 m, indicando a maior continuidade na distribuição espacial das propriedades do solo na camada mais profunda (Tabela 2 e Figura 2), concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (2001). A análise da relação $C_1/(C_1+C_0)$ das variáveis condutividade hidráulica do solo saturado, resistência do solo à penetração e teor de água do solo (Tabela 2) mostrou que as mesmas apresentaram dependência espacial moderada nas profundidades em estudo, exceto para resistência do solo à penetração que apresentou dependência espacial forte.

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para as variáveis condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}), resistência do solo à penetração (MPa) e teor de água do solo (kg kg^{-1}) nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m.

| Parâmetro | Atributos do solo | | |
|-------------------------|---|----------------------------------|----------------------|
| | Condutividade hidráulica do solo saturado | Resistência do solo à penetração | Teor de água do solo |
| 0,0-0,2 m | | | |
| Modelo | Esférico | Esférico | Esférico |
| Efeito pepita (C_0) | 17,7 | 0,09 | 1,40 |
| Patamar ($C_1 + C_0$) | 60,1 | 0,87 | 2,70 |
| Alcance (a) | 16,0 | 20,4 | 72,9 |
| $^1C_1/(C_1+C_0)$ % | 71,0 | 90,0 | 66,0 |
| $^2R^2$ (%) | 81,0 | 96,0 | 98,0 |
| ^3SQR | 36,5 | 3,7 E-03 | 0,07 |
| 0,2-0,4 m | | | |
| Modelo | Esférico | Esférico | Esférico |
| Efeito pepita (C_0) | 24,4 | 0,15 | 2,30 |
| Patamar ($C_1 + C_0$) | 80,5 | 0,59 | 3,70 |
| Alcance (a) | 18,0 | 25,0 | 77,2 |
| $C_1/(C_1+C_0)$ % | 72,0 | 80,0 | 61,0 |
| R^2 (%) | 85,0 | 95,0 | 95,0 |
| SQR | 70,5 | 4,2 E-03 | 0,64 |

¹- $C_1/(C_1+C_0)$ = grau de dependência espacial; ²- R^2 = coeficiente de determinação; ³- SQR = soma dos quadrados dos resíduos.

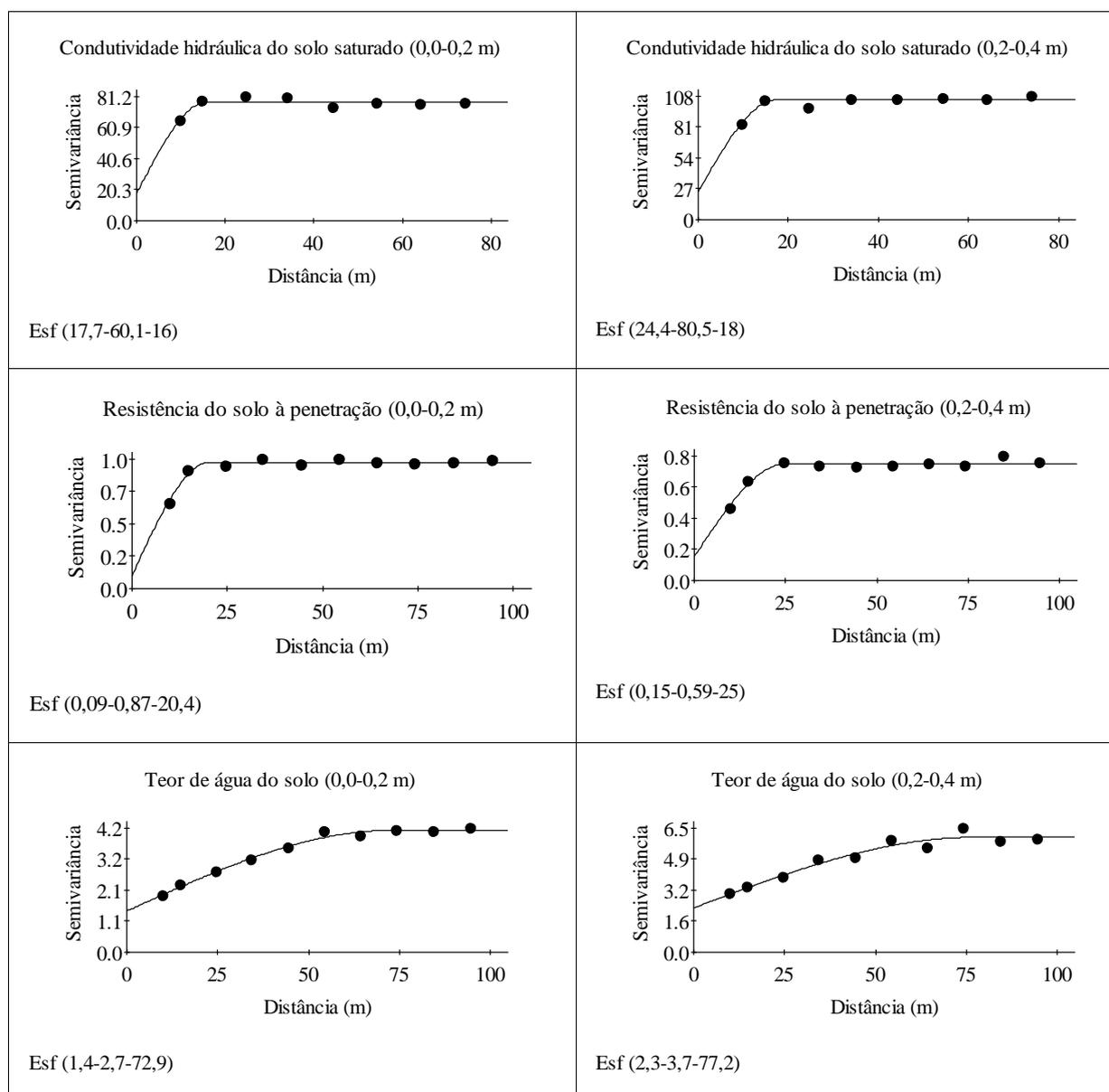


Figura 2. Semivariogramas das variáveis condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}), resistência do solo à penetração (MPa) e teor de água do solo (kg kg^{-1}) nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Esf (C_0 ; C_1+C_0 ; a), Esf = modelo esférico, C_0 = efeito pepita; C_1+C_0 = patamar; a = alcance.

Os parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados através da krigagem (Figura 3). Os mapas dos atributos estudados na profundidade de 0,0-0,2

m, apresentaram valores variando de 22 a 50 mm h^{-1} , 2,4 a 5,6 MPa e 18 a 24 kg kg^{-1} , respectivamente. Na profundidade de 0,2-0,4 m os valores variaram de 12 a 40 mm h^{-1} , 3,2 a 6,4 MPa e 19 a 25 kg kg^{-1} , respectivamente.

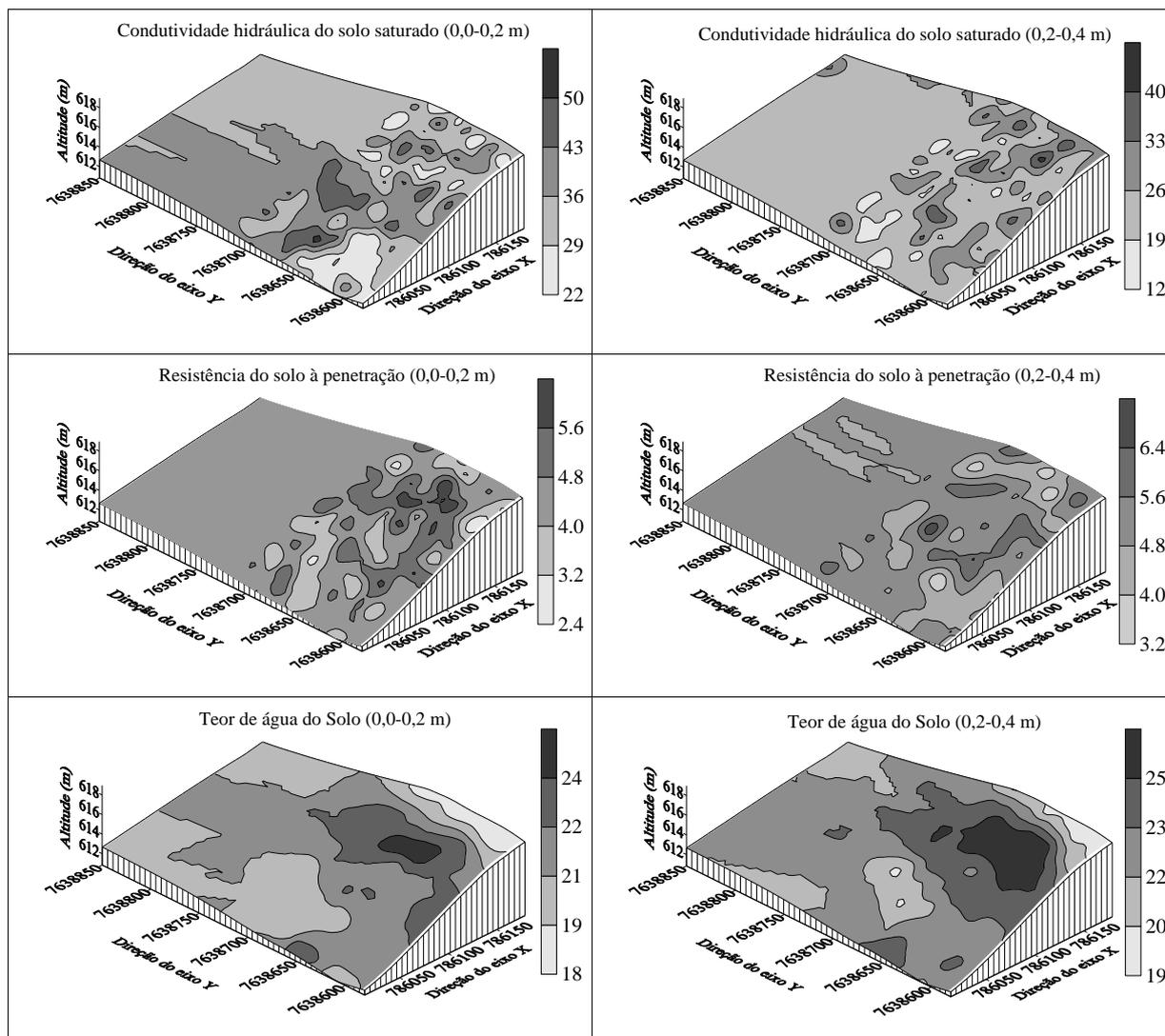


Figura 3. Distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}), resistência do solo à penetração (MPa) e teor de água do solo (kg kg^{-1}) nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m.

Os valores médios da condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 1 e Figura 3) foram classificados, segundo Soil Survey Staff, (1993), como lenta a moderada para a profundidade de 0,0-0,2 m e lenta para a profundidade de 0,2-0,4 m. Na classificação de REICHARDT, (1987), para solos tropicais, a velocidade básica de 15 a 30 mm h^{-1} é considerada alta. Os valores médios encontrados para a resistência do solo à penetração (Tabela 1 e Figura 3) estão compreendidos nas classes alta e muito alta nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente, de acordo com Soil Survey Staff (1993). Observa-se que houve um aumento relativo dos valores da resistência do solo à

penetração em profundidade (Tabela 1 e Figura 3), considerados restritivos ao desenvolvimento radicular segundo Arshad et al. (1996). Esses autores afirmam que valores desse atributo compreendido entre 2,0 a 4,0 MPa para solos argilosos na capacidade de campo, dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Os valores altos para a resistência do solo à penetração e baixos para a condutividade hidráulica do solo saturado estão relacionados com o tráfego intensivo de máquinas na cultura da cana-de-açúcar. Segundo Salire et al. (1994) sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas pesadas, podem promover compactação do solo até 0,4 m.

Comparando as informações da Figura 1 e os mapas de krigagem (Figura 3), observa-se que onde o compartimento é Linear (o relevo é mais homogêneo – compartimento I), todos os atributos estudados apresentam valores que indicam uma menor variabilidade espacial. No compartimento II (côncavo e convexo) os atributos apresentam os maiores intervalos de valores, caracterizando uma maior variabilidade espacial relativa nesse compartimento. Isso indica a dependência espacial dos atributos físicos e hídricos do solo aos elementos do relevo (pedoforma), o que reforça a importância da pedoforma para transferência de informações espaciais.

6 CONCLUSÕES

As variáveis estudadas apresentaram estrutura de dependência espacial com grau de dependência moderado para condutividade hidráulica do solo saturado e teor de água do solo e dependência espacial forte para resistência do solo à penetração. Os maiores alcances foram observados na profundidade de 0,2-0,4 m para todas as variáveis estudadas.

O mapeamento de compartimentos da paisagem na área de estudo mostrou-se muito eficiente na compreensão das causas e, transferência de informações da variabilidade espacial dos atributos estudados. Pequenas variações nas formas do relevo condicionam variabilidade diferenciada para atributos físicos e hídricos do solo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S.L. et al. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p.275-282, 2003.
- ARSHAD, M.A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special publication, 49).
- BATHKE, G.R.; CASSEL, D.K. Anisotropic variation of profile characteristics and saturated hydraulic conductivity in an ultisol landscape. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.55, n.2, p.333-339, 1991.
- BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.987-995, 2001.
- DANIELS, R.B.; HAMMER, R.D. **Soil geomorphology**. New York: John Wiley, 1992. 236 p.
- DIWU, J.Y. et al. Effect of tillage on the spatial variability of soil water properties. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v.40, n.1, p.1-8, 1998.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London, Academic Press, 1991. 600 p.
- LIBARDI, P.L. et al. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.1, p.85-90, 1986.
- MACEDO, J.R.; OTONNI FILHO, T.B.; MENEGUELLI, N.A. Variabilidade de

- características físicas, químicas e físico-hídricas em solo Podzólico Vermelho-Amarelo de Seropédica, RJ. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.12, p.2043-2053, 1998.
- MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, São Paulo, v.19, n.2, p.265-281, 2000.
- MEEK, B.D. et al. Bulk density of a Sand Loam: traffic, tillage and irrigation – method effects. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.56, n.2, p.562-565, 1992.
- MOHANTY, B.P.; MOUSLI, Z. Saturated hydraulic conductivity and soil water retention properties across a soil-slope transition. **Water Resources Research**, Washington, v.36, n.11, p.3311-3324, 2000.
- OLIVEIRA, J.B.; MENK, J.R.F. Variabilidade das características químicas e físicas em duas áreas homogêneas de Oxissolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 14., 1974, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1974. p.359-376.
- PACHEPSKY, Y.A.; TIMLIN, D.J.; RAWLS, W.J. Soil water retention as related to topographic variables. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.65, n.6, p.1787-1795, 2001.
- POULSEN, T.G. et al. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed field. **Soil Science**, Baltimore, v.166, n.3, p.153-162, 1985.
- PHILLIPS, D.L.; DOLPH, J.; MARKS, D.A. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v.58, n.1-2, p.119-141, 1992.
- RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A. Using field topographic to estimate soil water retention. **Soil Science**, Baltimore, v.167, n.7, p.423-435, 2002.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, 1987. 188 p.
- REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, Baltimore, v.140, n.4, p.292-302, 1985.
- ROBAINA, F.G.; SEIJAS, T.L. Distribución especial de la conductividad hidráulica de saturación en un área cañera de la llanura Habana-Matanzas. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, Habana, v.11, n.1, p.71-76, 2002.
- ROBERTSON, G. P. **GS⁺: geostatistics for the environmental sciences: GS⁺ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil Tillage Research**, Oxford, v.31, n.2-3, p.235-248, 1994.
- SAS. **Statistical analysis system for Windows: computer program manual**. Cary, 1995.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.115-122, 1998.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington: Department of Agriculture, Washington State University, 1993. 437 p. (Handbook, 18)
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.3, v.25, p.699-707, 2001.
- SURFER. Surfer 7.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers: user's guide**. New York: Golden software, 1999. 619 p.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

TRANGMAR, B. B. et al. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, n.1, p.45-94, 1985.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal Science**, v.263, n.3, p.616-627, 1965.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil Tillage Research**, Oxford, v.61, n.3-4, p.193-202, 2001.

VIEIRA, S.R. et al. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v.51, n.1, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; REYNOLDS, W.D.; TOPP, G.C. Spatial variability of hydraulic properties in a highly structured clay soil. In: WIERANGA, P.J.; BACHELET, D. (Ed.). **Validation of flow and transport models for the unsaturated zone**. Las Cruces: Department of Agronomy and Horticulture, New Mexico State University, 1988. p.471-483. (Research Report, 88-SS-04)

VIEIRA, S.R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **O Agrônomo**, Campinas, v.47-50, n.1-2, p.32-33, 1995-1998.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.