



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM ENCOSTA DO SEMIÁRIDO

Célia Silva dos Santos¹; Helder Gramacho dos Santos²; Abelardo Antonio de Assunção Montenegro³ & José Roberto Lopes da Silva⁴

RESUMO – Visando-se avaliar a distribuição da infiltrabilidade do solo no Semiárido Pernambucano, utilizou-se a geoestatística. Uma das técnicas onde é possível realizar uma descrição quantitativa da variabilidade, que pode contribuir para o planejamento e o manejo adequado de água e solo. Com o objetivo de avaliar a dependência espacial da condutividade hidráulica do solo saturado, foi desenvolvido um estudo na Bacia Representativa do Alto Ipanema, localizada no município de Pesqueira-PE. O experimento foi conduzido em uma área com malha regular 60 x 70 m, com pontos espaçados de 10 metros de distância, totalizando 42 pontos, onde foram feitos os testes de infiltração para determinar a condutividade hidráulica. A variável foi submetida à análise estatística clássica, seguida de análise geoestatística. A condutividade hidráulica do solo saturado apresentou forte dependência espacial.

ABSTRACT– Aiming to evaluate the distribution of the infiltration rate of the soil in semiarid Pernambucano, we used the geoestatística. One of the techniques where you can perform a quantitative description of the variability that can contribute to the planning and proper management of water and soil. In order to evaluate the spatial dependence of hydraulic conductivity, a study was developed at the Experimental Ipanema River Basin, located in Pesqueira, Pernambuco. The experiment was conducted in an area with regular mesh 60 x 70 m, with points spaced 10 meters apart, totaling 42 points, where the infiltration tests were done to determine the hydraulic

1) DEAGRI/PGEA/UFRPE - Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900, Recife-PE, Fone: (81) 9529-5441, e-mail: celia_agron@gmail.com;

2) CTG/PPGEOC/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n Cidade Universitária, 50740-530 Recife-PE, Fone: (81) 9761-6575, e-mail: agrohelder@gmail.com;

3) DEAGRI/PGEA/UFRPE - Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900, Recife-PE, Fone: (81) 8172-5157, e-mail: abelardo.montenegro@yahoo.com.br;

4) DEAGRI/PGEA/UFRPE - Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900, Recife-PE, Fone: (81) 3320-6264, e-mail: rlopes.s_@gmail.com;

conductivity. The variable was submitted to the classical statistical analysis, followed by geostatistical analysis. The variability of the data hydraulic conductivity was rated as poor spatial dependence.

Palavras-Chave – geoestatística, manejo de água e solo, dependência espacial

INTRODUÇÃO

Estudos que enfocam a variabilidade espacial de propriedades físicas, químicas e hidráulicas de solos têm grande relevância na literatura, principalmente como subsídio para o manejo racional de água e solo Cichota *et al.* (2003); Reichardt e Timm, (2004).

A Geoestatística, permite realizar uma descrição quantitativa da variabilidade espacial das propriedades do solo e a estimativa de valores dessas propriedades em locais não amostrados (Vieira, 2000). As alterações para corrigir variações indesejáveis da demanda de nutrientes, água ou até mesmo manejo, passam a ser delimitadas por mapas de isovalores das variáveis de interesse (Vieira, 2000). Dentre os estudos que utilizaram técnicas geoestatísticas para o mapeamento de propriedades do solo, podem-se citar: Montenegro *et al.* (2006), que avaliaram a variabilidade espacial de classes de textura, salinidade, e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial.

A maioria dos estudos sobre as propriedades físicas do solo tem apresentando uma ampla variedade de resultados, devido aos diferentes locais de estudo, tipos de solos e diferentes sistemas de manejo Grego e Vieira, (2005). Entretanto, segundo Campos *et al.* (2013), as propriedades físicas constituem bons indicadores da qualidade do solo e através delas podem ser realizados monitoramentos e encontrar áreas que sofreram algum tipo de interferência.

De modo que o conhecimento de características hidrodinâmicas do solo, tal como da condutividade hidráulica saturada do solo, é indispensável para o gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas de manejo do solo para fins de irrigação, drenagem e conservação do solo. Atualmente, várias técnicas experimentais vêm sendo realizadas para determinar as características hidrodinâmicas do solo diretamente no campo. Todavia, a complexidade, os custos elevados e o tempo de execução dessas técnicas são fatores limitantes na obtenção da caracterização hidrodinâmica do solo, principalmente em escala de bacias (Santos *et al.*, 2012).

Dentre as metodologias empregadas para a obtenção das características hidrodinâmicas, está o método semifísico conhecido como Beerkan (Braud *et al.*, 2003). Esse método propõe a estimativa da curva de condutividade hidráulica (Ks), considerando a textura e a estrutura do solo. O método Beerkan vem sendo aplicado em bacias com as mais diversas condições climáticas e de solo (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000).

Assim, objetivou-se neste trabalho, avaliar a dependência espacial da condutividade hidráulica do solo saturado da Bacia Experimental do Rio Ipanema.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A Bacia Representativa do Alto Ipanema, é uma das bacias proposta para estudo pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) junto à rede de hidrologia do semiárido (REHISA), é uma sub-bacia do sistema do Rio Ipanema, em sua porção ocidental mais a montante. Abrange parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco, numa área de 194,82 km².

A investigação dos parâmetros hidráulicos foi realizada em área de Assentamento Rural (Fazenda Nossa Senhora do Rosário), município de Pesqueira, Agreste pernambucano, distante 230 km de Recife – PE, com as seguintes coordenadas geográficas longitude – 36° 87', latitude – 8° 39', e altitude de 645 metros.

Amostragem

O experimento foi conduzido em uma área com malha regular, espaçada de 10 x 10 metros, formando um grid 60 x 70 e georreferenciadas usando o equipamento Estação Total, totalizando 42 pontos amostrais, como mostra a (Figura 1).

A área na qual foi implantado o grid apresenta-se em declive como pode ser visto pelas curvas de nível plotadas na Figura 1. Visando-se avaliar a presença de tendência nos dados buscou ajustar duas superfícies de tendência, as quais apresentaram os seguintes R², superfície de tendência de grau 1 : 18,70 % , superfície de tendência de grau 2 : 25,45 %. Os baixos valores do coeficiente de determinação permitem afirmar que não há tendência nos dados devido à declividade da área.

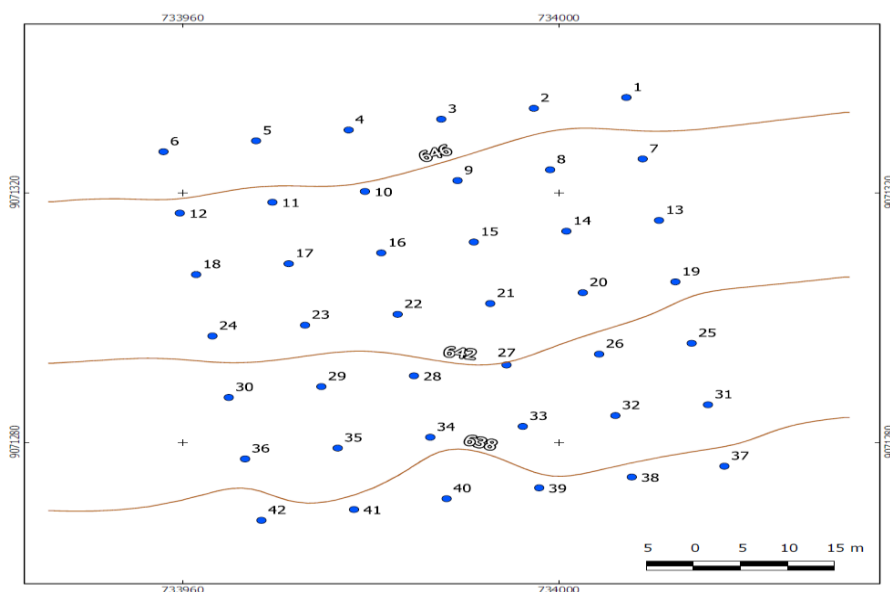


Figura 1 - Localização dos pontos de amostragem na área experimental

Método Beerkan

A metodologia conhecida como Beerkan é realizada através de ensaios simplificados de infiltração, utilizados para determinar os parâmetros hidrodinâmicos em escala local no campo.

Este método foi idealizado por Haverkamp *et al.* (1998) e apresenta uma grande vantagem em relação a outros métodos experimentais devido à sua aplicação que é mais simples, rápida e requer um número reduzido de pessoas e equipamentos, tornando-o mais econômico.

O método é utilizado para representar matematicamente o fenômeno da infiltração, ajustando as curvas de infiltração para determinar os parâmetros de condutividade hidráulica saturada do solo (K_s) visto na Equação (2).

$$Kfs = \frac{b1}{0,467 \left(\frac{2,92}{r \alpha} + 1 \right)} \quad (1)$$

em que $b1$ é um parâmetro da equação linearizada da reta. Sendo os valores de α^* , sugeridos quatro por valores * (0,036 , 0,012 , 0,004 e 0,001 milímetros) para utilização prática de permeâmetros e infiltrômetros em solos que variam de areias grossas para argilas compactadas. Um valor α^* de 0,012 milímetros foi considerado como sendo o valor de primeira aproximação para a maior parte dos solos de campo (Reynolds *et al.*, 2002).

Ensaio de campo

A aplicação do método Beerkan é realizada a partir de um teste simples de infiltração tridimensional, juntamente com coletas de solo para determinação da distribuição do tamanho das partículas, da umidade inicial e final, e da massa específica do solo. Os ensaios foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos operacionais:

- a) Um cilindro de PVC com um diâmetro de 180 mm foi posicionado na superfície do solo e inserido a uma profundidade de aproximadamente 1 cm. O método leva em consideração apenas as características hidrodinâmicas da camada superior do solo, e o aprofundamento do cilindro é apenas para evitar perdas laterais de água durante o processo de infiltração.
- b) Foram preparados quinze volumes com 150 ml de água, que foram vertidos no cilindro. O primeiro volume é vertido no cilindro e imediatamente após o esvaziamento do cilindro, outro volume de água é despejado em seu interior, anotando-se sempre o tempo que cada volume leva para infiltrar no solo. Esse procedimento foi repetido sucessivamente para os 15 volumes, até que o último volume de água no cilindro seja aplicado e o tempo de infiltração tende a estabilizar.

Análises de dados

A estatística descritiva foi utilizada determinando-se a média, a mediana, o desvio padrão, os

valores máximos e mínimos, os coeficientes de assimetria e curtose e o coeficiente de variação, para obter informações sobre a dispersão e a distribuição das variáveis, a análise de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade, para ambas as análises foi utilizado o programa GeoR v. 2.4.1 do software R (Ribeiro jr. e Diggle, 2001).

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística e do ajuste de semivariogramas. Com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a autocorrelação espacial entre locais vizinhos foi calculada através da semivariância $\gamma(h)$ a qual é estimada pela Equação (1):

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

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . O semivariograma é representado pelo gráfico $\gamma(h)$ versus h .

Para construção e ajuste dos semivariogramas foi utilizado os programas GEOEAS Englund e Sparks, (1991) G+ e o Microsoft Excel®. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram feitos conforme Vieira *et al.* (1983).

Após a obtenção dos semivariogramas experimentais por meio do software GEO-EAS, foram testados e ajustados modelos matemáticos (gaussiano, esférico, exponencial e linear) e definidos os parâmetros para os semivariogramas: a) efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h=0$; b) alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ; c) patamar (C_0+C_1) que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

Foi escolhido o modelo que apresentou um ajuste adequado aos valores experimentais e erros padronizados com média próxima a zero e desvio padrão próximo a um, segundo a técnica de validação cruzada de Jack-Knifing conforme Vauclin *et al.*,(1983).

Para determinar o grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella *et al.* (1994), que se baseia na análise da relação entre o efeito pepita e o patamar de seu semivariograma ajustado. Valores inferiores a 25% caracterizam forte dependência espacial, entre 25% e 75% moderada, enquanto que acima de 75% fraca dependência.

No que diz respeito à construção dos mapas de isolinhas, utilizando o algoritmo da krigagem, foi adotado o programa computacional Surfer Versão 9.0 (2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 pode-se observar as medidas de posição e dispersão para Ks e o seu logaritmo, observando-se o coeficiente de variação e comparando-o com classificação utilizada por WARRICK

& NIELSEN (1980) para caracterizar a variabilidade, a qual classifica como baixa um $C.V < 12\%$, média $12 \leq C.V \leq 62\%$) e alta um $C.V > 62\%$, podemos considerar que a condutividade hidráulica do solo saturado apresentou baixa variabilidade na área em estudo.

Inserir resultados de outros autores que encontraram resultados semelhantes e/ou diferentes.

Tabela 1. Medidas de posição e dispersão para a condutividade hidráulica do solo saturado (m/dia) e o seu logaritmo.

	Ks	Log Ks
Medidas de Posição		
Mínimo	0.000977	-6931
1° Quartil	0.002351	-6053
Mediana	0.005819	-5147
Média	0.008604	-5209
3° Quartil	0.008750	-4739
Máximo	0.046309	-3072
Medidas de Dispersão		
Variância	9.517402e-05	8.925853e-01
Desvio Padrão	0.009755717	0.944767330
Coefficiente de Variação	1.1337927	-0.1813857

Pode-se observar na Figura 2 que a logaritmização dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado promoveu uma distribuição mais uniforme dos dados. Inclusive no Box-plot de KS é possível observar cerca de cinco pontos discrepantes que após a transformação passaram a fazer parte dos limites da distribuição. A transformação em log não removeu toda a assimetria, mas melhorou significativamente a distribuição dos dados como pode ser observado tanto no Box-plot quanto no histograma do LogKs.

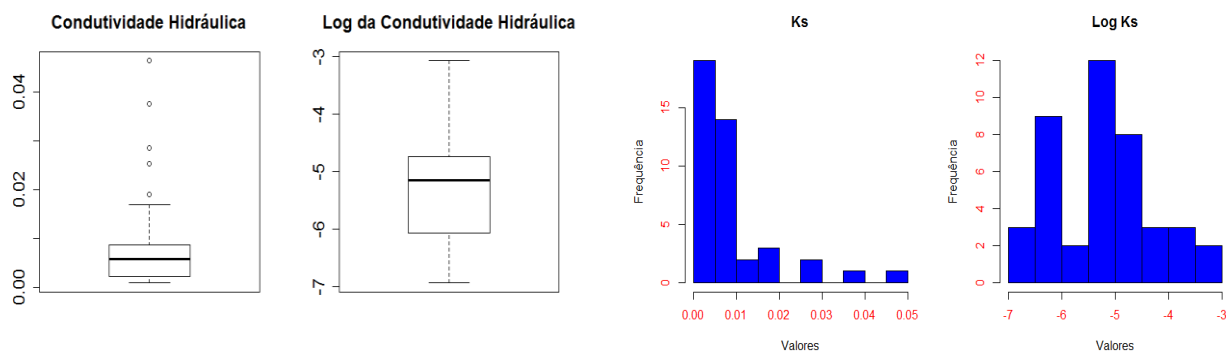


Figura 2 - Box-Plots e Histogramas para a para a condutividade hidráulica saturada e o seu logaritmo

Montenegro e Montenegro, (2006) afirmam que é comum, em análise hidrológica de solos, assumir-se a condutividade hidráulica como log-normalmente distribuída, sendo que tal comportamento tem sido amplamente verificado, podendo-se citar os trabalhos de Marsily (1986), Woodbury e Sudicky (1991), Istok *et al.* (1994) e Bosch e West (1998).

O primeiro passo foi calcular um semivariograma experimental, e ajustar um modelo teórico ao semivariograma, os resultados deste procedimento podem ser vistos na Figura 3.

Como pode-se observar cada ponto no semivariograma experimental está com uma numeração indicando o número de pares utilizados para calcular a semivariância. Todos os pontos foram calculados com número de pares superior a 30.

O modelo teórico ajustado foi o Esférico, foram obtidos os parâmetros efeito pepita, patamar e alcance os quais foram respectivamente $C_0=0,1477$, $C_1=0,7820$ e $A=17,9366$.

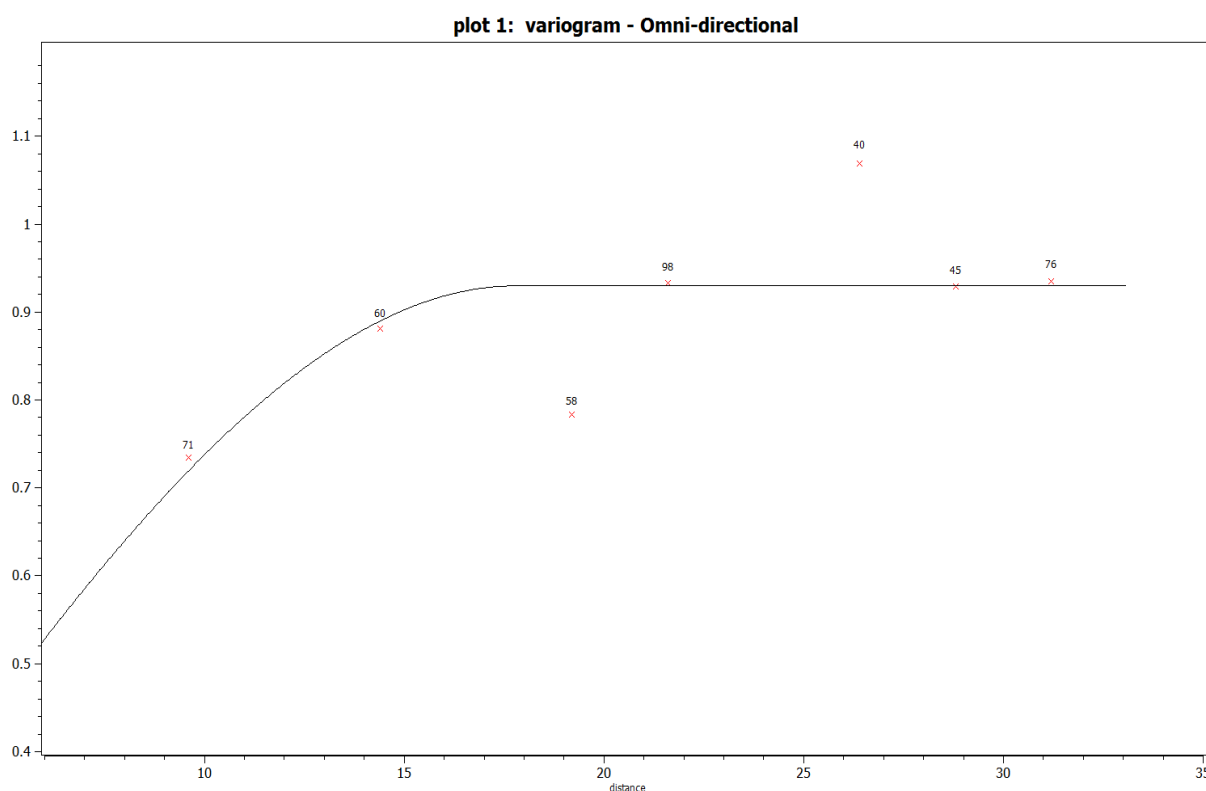


Figura 3 - Resultado do cálculo das semivariâncias para o LogKs

Para avaliar o grau de dependência espacial, foi utilizada a relação $[C_0/(C_0+C_1)]$, proposta por Cambardella *et al.* (1994), em que: C_0 é o valor da variância quando h tende a zero (efeito pepita) e (C_0+C_1) é a maior variância (patamar). Valores da relação inferiores a 25% caracterizam forte dependência espacial, entre 25 e 75% moderada e acima de 75%, fraca dependência espacial. Para a variável LogKS obteve-se um valor correspondente a 18,88% o que é indicativo de forte dependência espacial.

Foi realizada a validação cruzada do modelo teórico esférico ajustado onde foram obtidos os valores da média e desvio padrão respectivamente – 0,044 e 1,001.

A partir dos parâmetros fornecidos pelo modelo teórico do semivariograma foi realizada a Krigagem ordinária para a área de estudo e obteve-se o mapa de variabilidade espacial para LogKs, o qual podem ser visualizado na Figura 4.

Pode-se atribuir a forte dependência espacial à textura, fator que inevitavelmente influencia a capacidade de infiltração de água no solo. Além disso, a escala de amostragem utilizada, 10m entre pontos, é uma escala na qual há influência do manejo Berg e Klamt, (1997) afirmam que a variabilidade em distâncias abaixo de 100m estão relacionadas a um manejo desuniforme da área.

O alcance do semivariograma indica a distância (raio) na qual um ponto é dependente espacialmente dos demais, esta medida pode ser utilizada para elaborar planos de amostragem mais eficientes, para a variável LogKS o alcance de aproximadamente 18 m indica que duas amostras seriam suficientes para realizar uma amostra representativa da área em questão.

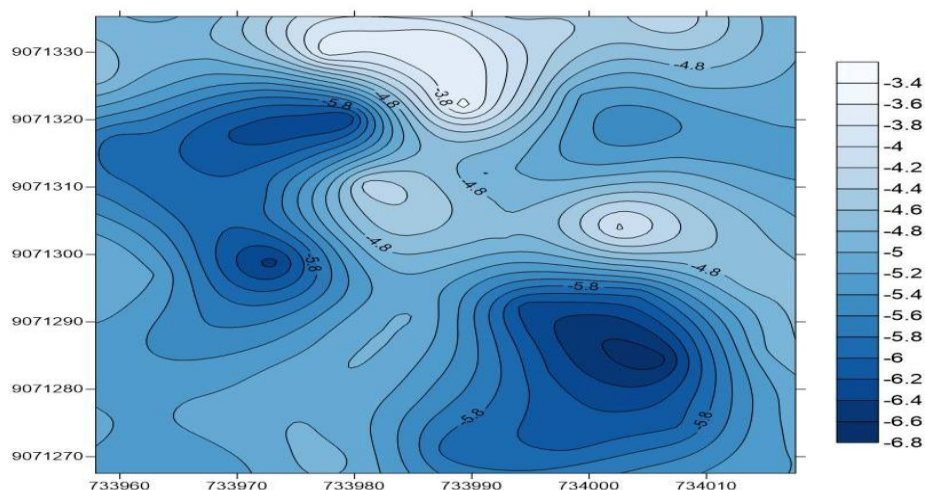


Figura 4 - Mapa de variabilidade espacial para LogKs

Souza *et al.* (2008) avaliaram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica utilizando o método Beerkan em uma malha de 25x25m (em dois tipos de solo, Neossolo Flúvico e Latossolo Amarelo) e verificaram que a condutividade hidráulica e a curva de retenção de água no solo apresentaram moderada variabilidade espacial relacionadas, o alcance do semivariograma ficou em torno de 120m, atribuíram a elevada variabilidade ao manejo agrícola tal como a outros atributos físicos.

Silva *et al.* (2012) avaliaram a condutividade hidráulica em duas bacias experimentais e classificaram utilizando o critério de Warrick e Nielsen (1980), nos resultados encontraram elevada variabilidade da condutividade hidráulica nas duas bacias, principalmente nas camadas superficiais, e atribuíram essa maior variabilidade ao manejo e uso do solo.

Montenegro e Montenegro (2006) avaliaram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica (por meio de testes de infiltração com infiltrômetro de duplo cilindro) ao longo de um vale, por meio de uma transecto no qual os pontos estavam espaçados de 30m, os resultados mostraram que K_s apresentou moderada variabilidade e os semivariogramas ajustados tiveram alcance em torno de 400m.

Santos *et al.* (2012) avaliaram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica (utilizando o permeâmetro de Guelph), ao longo de um vale, por meio de uma transecto no qual os pontos estavam com espaçamento médio de 64m, Log K_s apresentou valor de CV de 261%, evidenciando uma alta heterogeneidade para os solos da área de estudo, os semivariogramas ajustados apresentaram alcance em torno de 135m.

De acordo com a classificação de Lambe *et al.* (1969), a área pode ser caracterizada como de baixa condutividade hidráulica, onde todos os pontos amostrados ficaram dentro do limite 10^{-2} - 10^{-5} mm s⁻¹. Como todos os pontos ficaram dentro de uma mesma classe de condutividade hidráulica foi utilizada a mediana da distribuição para calcular o percentual de área que está acima e abaixo desta. Observou-se que 44,38 % da área está acima desse limite e 55,62% está abaixo.

CONCLUSÕES

A Transformação Log normalizou a distribuição dos dados de condutividade hidráulica;

A área foi caracterizada como de forte dependência espacial;

Na prática duas amostras seriam suficientes para caracterizar a condutividade hidráulica na área de estudo;

BIBLIOGRAFIA

ANGULO J. R.; VANDERVAERE, J.-P.; ROULIER, S.; THONY, J.-L.; GAUDET, J.-P.; VAUCLIN, M. *Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments.* Soil and Tillage Research, v. 55, n. 1, p. 1—29, 2000.

BRAUD, I.; HAVERKAMP, R.; ARRÚES, J. L.; LOPÉZ, M. V. *Spatial variability of soil surface properties and consequences for the annual and monthly water balance of a semiarid environment (EFEDA Experiment).* Journal of Hydrometeorology, v.4, n. 1, p. 121—137, 2003.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. *Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils*. Soil Science Society of America Journal, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C. *Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta*. Comunicata Scientiae 4(2): 168-178, 2013.

CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. ROJAS, C. A. L. *Variabilidade espacial da taxa de infiltração em argissolo vermelho*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.27, n.5, p.789-798, 2003.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análises de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p

GREGO, C. L.; VIEIRA, S.R. *Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

HARGREAVES, G.H. *Climatic zoning for agricultural production in northeast Brazil*. Logan: Utah State University, 1974. 6p.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. *Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 10, n.1, p. 30-37, 2006.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri, SP: Manole, 2004. 478p.

SANTOS, C. A. G.; SILVA J. F. C. B. C. *Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do riacho Guaraíra utilizando o método Beerkan*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.4 - Out/Dez 2012, 149-160.

SILVA, J. R. L. da.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. dos.; *Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.16, n.1, p.27–36, 2012.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; JARAMILLO, R. A.; NETTO, A. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, E. B. *Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no Estado da Paraíba*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.1795-1804, 2008.

SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.; FONTES J. R. V. P.; ANDRADE, T. *Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Impresso), v. 16, p. 828-835, 2012.

VIEIRA, S. R. *Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-53, 2000.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. *Spatial variability of soil physical properties in the field*. In: HILLEL, D. Environmental soil physics. New York: Academic, 1998. p.655-675.