

VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO EM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO, NO MUNICÍPIO DE CRUZ DAS ALMAS

KARLA SILVA SANTOS ALVARES DE ALMEIDA¹; LUCIANO DA SILVA SOUZA¹; VITAL PEDRO DA SILVA PAZ¹; FAGNER TAIANO DOS SANTOS SILVA²; DAVI NEY SANTOS¹ E JULIANA DA SILVA LOPES PEREIRA¹

¹*Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, Rua Rui Barbosa, 710 – Campus Universitário – CEP 44380-000 – Cruz das Almas – BA, Brasil, e-mail: karlasilvasantos@yahoo.com.br; lsouza@ufrb.edu.br; vitalpaz@ufrb.edu.br; davineysantos@gmail.com; jslpereira@hotmail.com*

²*Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Av. Luiz de Camões, 2090 – CEP 88520-000 - Lages – SC, Brasil, e-mail: ftssilva.ufrb@gmail.com*

1 RESUMO

O objetivo desse trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) utilizando dois métodos de laboratório e amostras com diferentes volumes em Latossolo Amarelo Distrocoeso localizado no Município de Cruz das Almas. Foram coletadas amostras com estrutura indeformada em dois tipos de anéis volumétricos com 0,081 m de altura e 0,070 m de diâmetro ($\approx 312 \text{ cm}^3$) e com 0,05 m de altura e de diâmetro (98 cm^3). Nos mesmos pontos de amostragem da K_0 foram coletadas amostras deformadas para quantificação de areia, silte, argila, porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo em uma malha amostral de 7 x 7 pontos espaçados em 2,0 x 2,0 m, totalizando uma área de 196,0 m². Os resultados foram submetidos à análise estatística exploratória e teste de normalidade de Shapiro-Wilk; posteriormente, verificou-se a dependência espacial pela análise geoestatística. Os resultados revelaram que para a profundidade de 0-0,15 m a condutividade hidráulica determinada no permeâmetro de carga constante no cilindro de volume maior apresentou menor coeficiente de variação, indicando uma melhor representatividade das amostras; a densidade do solo apresentou índice de dependência espacial moderada, com alcance de 1,22 m e semivariograma tipo esférico para a profundidade de 0-0,15m; para a profundidade de 0,15-0,30 o índice de dependência espacial foi forte, com alcance de 1,54 m e semivariograma tipo exponencial.

Palavras-chave: condutividade hidráulica saturada, Tabuleiro Costeiro, geoestatística.

ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA, L. S.; PAZ, V. P. S.; SILVA, F. T. S.; SANTOS, D. N.; PEREIRA, J. S. L.

SPATIAL VARIABILITY OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SATURATED SOIL IN YELLOW LATOSOL THICKENED AND WITH LOW FERTILIT, IN THE MUNICIPALITY OF CRUZ DAS ALMAS

2 ABSTRACT

The objective of this work was to characterize the spatial variability of hydraulic conductivity of the saturated soil (K_0) using two laboratory methods and samples with different volumes in Yellow thickened Latosol with low fertility, located in the Municipality of Cruz das Almas. Samples with undeformed structure were collected in two types of volumetric rings with 0.081 m height and 0.070 m diameter ($\approx 312 \text{ cm}^3$) and with 0.05 m in height and in diameter (98 cm^3). At the same K_0 sampling points, deformed samples were collected for quantification of sand, silt, clay, total porosity, macro and microporosity, soil density in a sample mesh of 7 x 7 points spaced 2.0 x 2.0 m, totaling an area of 196.0 m^2 . The results were submitted to exploratory statistical analysis and Shapiro-Wilk normality test; later, the spatial dependence was verified by the geostatistical analysis. The results showed that for the 0-0.15 m depth the hydraulic conductivity determined in the constant load permeability in the larger volume cylinder showed lower coefficient of variation, indicating a better representativeness of the samples; The soil density presented a moderate spatial dependence index, with a range of 1.22 m and spherical semivariogram for the depth of 0-0.15 m; for the depth of 0.15-0.30 the spatial dependence index was strong, with a range of 1.54 m and exponential type semivariogram.

Keywords: saturated water conductivity, coastal board, geostatistics

3 INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que assume grande importância por medir a facilidade com que os poros do solo transmitem água, descrevendo a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades relacionadas com a sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. O movimento de água no perfil do solo é um componente muito importante no estudo de problemas relacionados à agricultura e ao ambiente.

A condutividade hidráulica pode ser medida desde o solo saturado, onde todos os seus poros estão preenchidos com água, ou com conteúdo menor de água, ou seja, em solo não saturado. De acordo com Ellies; Grez; Ramirez (1997), a condutividade hidráulica saturada do solo (K_0) pode ser descrita como a funcionalidade do seu sistema poroso, englobando a quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Eles também relataram que a condutividade hidráulica depende em grande parte da forma e continuidade do sistema poroso, e varia de um local para outro, apresentando em alguns locais valores extremos e diferindo também para as distintas orientações do solo.

A K_0 é dependente tanto da estrutura quanto da textura do solo. As práticas culturais adotadas alterando a estrutura do solo influenciam diretamente a K_0 até mais do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade da K_0 em locais próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

Com os distintos usos do solo a porosidade se modifica. Paralelamente a isso deve-se modificar também a K_0 . A magnitude dessas modificações estruturais ocasionadas pelo manejo depende da ocorrência e da frequência das operações de práticas agrícolas superficiais e subsuperficiais no solo e, também, do efeito compactante produzido pelo trânsito do maquinário agrícola ou de animais (MESQUITA; MORAES, 2004).

Na prática, várias medidas de condutividade hidráulica saturada são requeridas para caracterizar um solo, devido à grande variabilidade espacial desse atributo (SANTOS, 2011). Existem referências na literatura que mostram que os valores de condutividade hidráulica de uma área específica podem ser muito variáveis, assumindo elevados coeficientes de variação (MESQUITA, 2001; WARRICK; NIELSEN, 1980).

A condutividade hidráulica pode ser estimada em laboratório ou em campo, ressaltando-se neste trabalho os métodos de laboratório. A determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) pode ser realizada por meio de permeômetros de carga constante ou de carga decrescente (LIBARDI, 2005). A diferença mais importante entre o escoamento em meio saturado e não saturado está na condutividade hidráulica (HILLEL, 1971). Quando o solo se encontra saturado, todos os poros estão preenchidos e conduzindo água, sendo sua condutividade máxima nessa condição. Quando o solo se torna não saturado, alguns poros ficam preenchidos por ar e a condutividade hidráulica decresce rapidamente.

Perturbações na superfície do solo podem influenciar nos valores da condutividade hidráulica e proporcionar resultados que não condizem com o solo estudado (SILVA; LIBARDI, 2000). O volume da amostra deve ser adaptado ao sistema poroso do solo, procurando conter um número representativo de cada classe de poros.

O uso de técnicas geostatísticas possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos. Estudos mais específicos com atributos físicos do solo evidenciaram que eles variam de local para outro, apresentando continuidade ou dependência espacial, dependendo do manejo adotado e do material de origem do solo (SILVA; REICHERT; REINERT, 2004; SOUZA et al., 2006; AMARO FILHO et al., 2007; CAMARGO et al., 2008; BOTTEGA et al., 2011).

O presente trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado utilizando dois métodos de laboratório e amostras com diferentes volumes em Latossolo Amarelo Distrocoeso localizado no Município de Cruz das Almas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no campo experimental do Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas (CCAAB) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no município de Cruz das Almas/BA. O clima de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Aw a Am, tropical quente e úmido. A precipitação média anual é de 1.026 mm, distribuída em 63% no período úmido (março a agosto) e 37% no período seco (setembro a fevereiro), com temperatura média anual de 24,2°C (ALMEIDA, 1999). O solo foi classificado com Latossolo Amarelo Distrocoeso.

Para o estudo da condutividade hidráulica do solo saturada (K_0) foram utilizadas amostras com estrutura indeformada coletadas em dois tipos de anéis volumétricos com 0,081 m de altura e 0,070 m de diâmetro (312 cm³) e com 0,05 m de altura e de diâmetro (98 cm³). Foram coletadas também amostras deformadas para análise granulométrica e determinação da porosidade total, macro e microporosidade e densidade do solo. As amostras foram retiradas nas camadas de 0-0,15 e 0,15-0,30 m numa malha amostral de 7 x 7 pontos espaçados de 2,0 x 2,0 m, totalizando uma área de 196 m². Dentro da malha de amostragem foram sorteados três pontos para coleta de amostras distanciadas entre 0,50; 1,00 e 1,50 m entre as linhas e colunas. Os pontos sorteados foram 20, 25 e 31.

Após as coletas esses anéis foram acondicionados em filme plástico para evitar perda de umidade, sendo preparadas no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, onde foram realizadas as análises.

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (GEE; OR, 2002), usando como dispersante o hidróxido de sódio (NaOH 1 mol L⁻¹). A fração areia foi separada por peneiramento, a argila por sedimentação e a fração silte por subtração das demais frações em relação à amostra original.

A distribuição de poros por tamanho foi determinada pelo método da mesa de tensão (OLIVEIRA, 1968), sendo a macroporosidade representada pela umidade volumétrica entre a amostra saturada e a amostra submetida à tensão de 60 cm de coluna de água, enquanto a microporosidade foi representada pela umidade volumétrica entre a amostra após tensão e a amostra seca a 105°C; da soma das duas resultou a porosidade total determinada.

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico com volume aproximado de 310 cm³ (GROSSMAN; REINSCH, 2002). Utilizou-se a seguinte expressão para o cálculo da D_s:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad (1)$$

Em que:

D_s – densidade do solo (kg dm⁻³);

M_{ss} – massa de solo seco (kg);

V_s – volume de solo (dm³).

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado determinada pelo permeâmetro de carga decrescente (LIBARDI, 2005), os cilindros volumétricos com 98 cm³ foram inseridos em dispositivo composto por tubo de acrílico disposto sobre módulo de encaixe, logo após terem sido beneficiadas e colocadas para saturação por meio da elevação gradual da carga hidráulica, durante período de 24 horas.

Antes do início das medidas foram delimitados dois pontos no tubo de acrílico denominados H1 e H2, de modo que fosse possível acompanhar os respectivos tempos (t1 e t2) por meio da utilização de um cronômetro. A partir do momento em que o nível da água ultrapassou o ponto H1, o cronômetro foi acionado, sendo o mesmo pausado quando o nível da água atingiu o ponto H2, sendo possível determinar o intervalo de tempo gasto para o deslocamento da água ao longo do sistema.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K₀), em cm h⁻¹, foi calculada a partir da seguinte equação analítica (LIBARDI, 2005):

$$K_0 = \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \ln \left(\frac{H1}{H2} \right) \quad (2)$$

Em que:

H1 e H2 – potencial inicial e final, respectivamente, em cm;

Δt – intervalo de tempo, em h, para o nível da água no tubo de acrílico cair de H1 para H2;

A – área da seção transversal da amostra do solo, em cm²;

a – área da seção transversal do tubo de acrílico, no qual se medem os potenciais inicial e final;

L – altura da amostra de solo, em cm.

A condutividade hidráulica saturada foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante (YOUNGS, 1991), utilizando cilindros volumétricos com 98 e 312 cm³. Em cada amostra manteve-se carga hidráulica constante utilizando-se de frasco de Mariotte. O volume de água coletado foi medido com proveta em intervalos de tempo determinados; quando de três a cinco medições consecutivas de vazão apresentaram resultados semelhantes, considerou-se que o fluxo era estacionário. A condutividade hidráulica foi calculada a partir da equação:

$$K_0 = \left(\frac{Q \times L}{A \times H \times t} \right) \quad (3)$$

Em que:

K – condutividade hidráulica em cm h⁻¹;

Q – volume do percolado em mL, ou seja, o valor da última leitura quando não houve variação entre os valores anteriores, ou a média das duas leituras quando há alguma variação;

L – altura do bloco do solo em cm;

H – altura do bloco do solo + coluna de água em cm;

A – área do cilindro em cm²;

t – tempo em horas.

Para análise dos dados, primeiramente utilizou-se a análise descritiva, calculando-se a média, mediana, moda, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficientes de assimetria e curtose, verificação da normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e verificação da presença de valores periféricos (“outliers”). Para identificar “outliers” utilizou-se a distância interquartil (IQR), que é resultado da diferença entre o limite do quartil inferior (FI) e o do quartil superior (FS). As barreiras de “outliers” foram estabelecidas como FS + 1,5 x IQR e FI – 1,5 x IQR, significando que os valores acima da primeira e abaixo da segunda são possíveis candidatos a “outliers” (LIBARDI et al., 1996). O enquadramento nas classes de variação foi realizado conforme proposto por Warrick; Nielsen (1980), os quais sugerem três classes: variabilidade baixa (CV < 12 %), média (12% < CV < 60 %) e alta (CV > 60 %).

Em seguida verificou-se a dependência espacial dos dados, seguindo-se os princípios da análise geoestatística (VIEIRA, 2000), por meio do cálculo do semivariograma:

$$y^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2 \quad (4)$$

Em que:

N(h) – é o número de pares experimentais de observações Z(xi) e Z(xi+h), separados por uma distância h.

Para a determinação do índice de dependência espacial (IDE), que é a proporção em porcentagem do efeito pepita (Co) em relação ao patamar (Co + C), foi utilizada a equação [Co/(Co + C)] proposta por Cambardella et al. (1994), sendo considerado forte se a razão for IDE ≤ 25%, moderada quando >25% e < que 75%(25 < IDE < 75%), e fraca de ≥ 75% e < 100% (75 ≤ IDE < 100%), sendo também considerada independente (distribuição aleatória) quando a razão for igual a 100%. Com base nos semivariogramas obtidos foram gerados mapas de krigagem.

A análise estatística descritiva foi realizada por meio do software SAS 9.0 (SAS INSTITUTE, 2004). As análises geoestatísticas e a interpolação dos dados pelo método de krigagem foram realizadas utilizando-se o programa GS+ (Gamma Design Software, 2000).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da estatística descritiva para as profundidades de 0-0,15 e 0,15-0,30 m são apresentados na Tabela 1. Para a profundidade 0-0,15 m, a areia total, argila e silte apresentaram valores de média, moda e mediana distantes entre si, indicando distribuição não normal dos dados, o que foi confirmado pelo teste de Shapiro-Wilk. A densidade do solo, a porosidade total, macro e microporosidade apresentaram esses valores bem próximos, mostrando uma distribuição normal dos dados, que pode ser confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk.

A K_0 determinada no permeâmetro de carga constante e utilizando cilindros de maior volume (312 cm^3) apresentou valores de média e mediana próximos, bem como distribuição normal dos dados, confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk. A K_0 determinada no cilindro menor (98 cm^3), tanto no permeâmetro de carga constante como no de carga decrescente, apresentou valores de média, mediana e moda distantes entre si, mostrando distribuição não normal dos dados, confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Na profundidade de 0,15-0,30 m foi possível verificar que os atributos texturais (areia, silte e argila) apresentaram valores de média, mediana e moda próximos entre si, indicando distribuição normal, confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk. O mesmo aconteceu para a densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade.

Os coeficientes de variação (CV) para os atributos texturais (Tabela 1) apresentaram-se baixos ($CV < 12\%$) e médios ($12\% < CV < 60\%$) para argila e silte para areia para ambas profundidades (0-0,15 e 0,15-0,30 m). Estes resultados podem estar associados ao comportamento diferencial das partículas quanto à facilidade de movimentação e translocação, maiores para argila e silte do que para areia, por seu maior peso e tamanho. O coeficiente de variação foi baixo para microporos e porosidade total e médio para macroporosidade, para ambas as profundidades, situação que também foi encontrada para porosidade total e microporosidade por Kamimura et al. (2013), quando estudaram a variabilidade espacial de atributos físicos de Latossolo Vermelho-Amarelo sob lavoura cafeeira. A densidade do solo apresentou baixo coeficiente de variação.

Ao comparar os valores de média e mediana de K_0 para as duas profundidades e os dois métodos avaliados, observa-se que a primeira é sempre maior. Isso ocorre porque a média é mais sensível a valores extremos, os quais estão do lado direito da distribuição, conforme indica o sinal positivo do coeficiente de assimetria. Essa assimetria ocorreu provavelmente porque alguns dos fatores que podem interferir no valor K_0 , a exemplos da presença de raiz, fissura causada por animais, tais como minhocas ou formigas tenderem a superestimá-lo.

Analisando os valores médios de K_0 na Tabela 1, para os dois métodos e com relação ao tamanho da amostra utilizados, percebe-se que houve diferença significativa entre os métodos. No geral, os dois métodos de laboratório aqui considerados, apresentaram elevados coeficientes de variação (CV), nas duas profundidades e comparando-se os dois métodos avaliados. De acordo com Warrich e Nielsen (1980), o coeficiente de variação da K_0 poderá atingir valores maiores do que 420%. Entretanto, ao analisarmos o CV da condutividade hidráulica determinada pelo permeâmetro de carga constante utilizando amostras com volume

de solo maior e menor, este último apresentou maior CV, indicando que a utilização de amostras de solo coletadas em cilindro de maior volume, tem uma melhor representatividade da amostra. Um procedimento que deve ser considerado para uma melhor quantificação da K_0 é a coleta de amostras em cilindros maiores ou a determinação direta no campo, minimizando assim as influências negativas que pequenas amostras exercem na determinação desse parâmetro.

Em determinações de laboratório, utilizando o permeâmetro de carga constante Lima et al. (2006) verificaram coeficiente de variação entre 112% e 248% para a condutividade hidráulica quando estudaram a qualidade físico-hídrica de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes manejos cultivados com soja (*Glycine max* L.) e outro com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

O permeâmetro de carga constante apresentou CV médio nas duas profundidades avaliadas, para a condutividade hidráulica utilizando cilindros de volume maior. Na condutividade hidráulica utilizando cilindros de volume menor, o coeficiente de variação foi alto para as duas profundidades. Já a condutividade hidráulica determinada pelo método do permeâmetro de carga decrescente apresentou CV alto para a profundidade 1 e médio para a profundidade 2.

Tabela 1. Análise descritiva dos atributos de qualidade física de um Latossolo Amarelo Distrocoeso, no Município de Cruz das Almas-BA.

Profundidade de 0-0,15 m														
Variáveis	n	Média	Mediana	Moda	Variância	Desvio padrão	Assimetria	Curtose	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil	P<W	CV
KPCCMA ⁽¹⁾ (cm h ⁻¹)	67	60,76 a ⁽²⁾	57,11	-	1081,30	32,88	0,33	-0,84	5,06	135,05	34,16	85,79	0,97 ⁿ	54,12
KPCCME (cm h ⁻¹)	65	29,00 b	19,03	4,19	823,66	28,70	1,12	0,20	0,52	99,25	5,88	40,66	0,84 ^{Nn}	98,97
KPCD (cm h ⁻¹)	64	21,91 b	11,43	11,43	558,53	23,63	1,20	0,42	0,26	89,67	4,19	37,335	0,82 ^{Nn}	107,88
AT (g kg ⁻¹)	66	765,60	780,00	700,00	2546,96	50,47	-0,77	0,22	627,00	869,00	726,00	801,00	0,93 ^{Nn}	6,59
ARG (g kg ⁻¹)	66	144,60	142,00	120,00	2763,87	52,57	0,24	-0,36	40,00	262,00	102,00	181,00	0,97 ⁿ	36,35
SILTE (g kg ⁻¹)	67	89,80	90,00	25,00	1616,80	40,21	0,20	-0,52	14,00	193,00	59,00	119,00	0,99 ⁿ	44,75
Ds (g cm ⁻³)	64	1,63	1,64	1,67	0,01	0,11	-0,09	0,38	1,34	1,89	1,55	1,70	0,99 ⁿ	6,79
PT (m ³ m ⁻³)	65	0,38	0,38	0,37	0,00	0,04	0,36	0,68	0,28	0,49	0,35	0,40	0,98 ⁿ	10,47
MACRO (m ³ m ⁻³)	66	0,17	0,18	0,18	0,00	0,05	0,22	0,00	0,06	0,30	0,14	0,20	0,99 ⁿ	27,19
MICRO (m ³ m ⁻³)	65	0,20	0,21	-	0,00	0,02	-0,09	-0,28	0,15	0,26	0,19	0,22	0,99 ⁿ	11,80
Profundidade de 0,15-0,30 m														
KPCCMA ⁽¹⁾ (cm h ⁻¹)	67	49,19 a	45,48	-	725,23	26,93	0,38	-0,70	2,37	109,33	27,53	68,23	0,97 ⁿ	54,75
KPCCME (cm h ⁻¹)	64	20,08 b	10,14	2,74	478,35	21,87	1,53	1,61	0,76	83,29	5,23	32,23	0,78 ^{Nn}	108,92
KPCD (cm h ⁻¹)	56	7,52 c	6,90	5,05	19,82	4,45	0,72	0,88	0,32	22,64	4,02	10,685	0,95 ^{Nn}	59,24
AT (g kg ⁻¹)	64	729,61	722,00	722,00	1389,84	37,28	0,25	-0,29	638,00	818,00	702,00	753,00	0,98 ⁿ	5,11
ARG (g kg ⁻¹)	67	179,56	181,00	181,00	2351,35	48,49	-0,08	-0,19	60,00	283,00	141,00	220,00	0,98 ⁿ	27,04
SILTE (g kg ⁻¹)	66	90,83	88,00	78,00	1237,17	35,17	-0,47	-0,19	3,00	149,00	72,00	117,00	0,97 ⁿ	38,79
Ds (g cm ⁻³)	62	1,66	1,67	1,69	0,01	0,08	-0,11	0,03	1,48	1,84	1,61	1,70	0,99 ⁿ	4,70
PT (m ³ m ⁻³)	66	0,39	0,39	0,37	0,00	0,04	0,11	-0,43	0,31	0,49	0,37	0,42	0,99 ⁿ	9,94
MACRO (m ³ m ⁻³)	65	0,20	0,20	-	0,00	0,04	-0,06	0,06	0,10	0,29	0,17	0,22	0,98 ⁿ	21,86
MICRO (m ³ m ⁻³)	66	0,20	0,20	0,19	0,00	0,02	0,38	-0,64	0,16	0,24	0,18	0,21	0,97 ⁿ	9,99

⁽¹⁾ KPCCMA: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante, com cilindro volumétrico maior (312 cm³); KPCCME: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante, com cilindro volumétrico menor (98 cm³); KPCD: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga decrescente, com cilindro volumétrico menor (98 cm³); AT: areia total; ARG: argila; Ds: densidade do solo; PT: porosidade total; MACRO: macroporosidade; MICRO: microporosidade; CV: coeficiente de variação. Nn: distribuição não normal dos dados; n: distribuição normal dos dados.

⁽²⁾ Valores médios de condutividade hidráulica com a mesma letra, em cada profundidade, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Marques et al. (2008) em um estudo da avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas, concluíram que o método do permeâmetro de carga constante é o mais apropriado para a classe dos Latossolos estudados, apresentando os menores coeficientes de variação e desvio padrão ao longo da topossequência.

A variância, o desvio-padrão, o coeficiente de variação e os valores mínimo e máximo fornecem a ideia da magnitude da dispersão de um conjunto de variáveis, porém nada informam sobre a estrutura de dependência espacial dos mesmos, o que só é possível por meio da geoestatística e geração do semivariograma (SOUZA, 1999), sendo assim necessária a utilização dos princípios da geoestatística para contextualizar a dependência espacial. Para a profundidade de 0-0,15 m, a condutividade hidráulica do solo saturado determinada no permeâmetro de carga constante tanto no cilindro de maior volume, quanto o de menor volume, os atributos texturais areia total argila e silte, a porosidade total e a macro e microporosidade, apresentaram efeito pepita puro (EPP), que indica a variabilidade não explicada em razão da distância de amostragem utilizada (SOUZA et al., 2006) ou seja, não revelaram dependência espacial (Tabela 2), não sendo, por isso, possível ajustar um modelo teórico de semivariograma experimental. No entanto, a condutividade hidráulica do solo saturado determinada permeâmetro de carga decrescente no cilindro de menor volume, e a densidade do solo se ajustaram aos modelos esférico e exponencial, indicando que estes atributos estudados apresentaram dependência espacial, que é expressa por meio dos ajustes aos modelos de semivariogramas, que podem ser observados na figura 1.

Tabela 2. Parâmetros de dependência espacial para atributos de qualidade física de um Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas-BA.

Profundidade de 0-0,15 m						
Atributos	Modelo	Co	Co+C ₁	A (m)	IDE	R ²
KPCCMA ⁽¹⁾	EPP					
KPCCME	EPP	-	-	-	-	-
KPCD	Esférico	1	561,2	2,69	0,2	0,337
AT	EPP	-	-	-	-	-
ARG	EPP	-	-	-	-	-
SILTE	EPP					
Ds	Exponencial	0,0037	0,0127	1,22	29,1	0,883
PT	EPP					
MACRO	EPP	-	-	-	-	-
MICRO	EPP	-	-	-	-	-
Profundidade de 0,15-0,30 m						
Atributos	Modelo	Co	Co+C ₁	A (m)	IDE	R ²
KPCCMA	Exponencial	285	725,8	2,00	39,3	0,896
KPCCME	Esférico	110	478,1	2,78	23,0	0,968
KPCD	EPP					
AT	EPP	-	-	-	-	-
ARG	EPP	-	-	-	-	-
SILTE	Exponencial	372	1237	0,83	30,1	0,770
Ds	Exponencial	0	0,0061	1,54	0,0	0,811
PT	EPP	-	-	-	-	-
MACRO	EPP					
MICRO	Esférico	0,0002	0,0004	5,57	50,0	0,874

⁽¹⁾KPCCMA: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante, com cilindro volumétrico maior (312 cm³); KPCCME: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante, com cilindro volumétrico menor (98 cm³); KPCD: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga decrescente, com cilindro volumétrico menor (98 cm³); EPP: efeito pepita puro; Co: efeito pepita; Co+C₁: patamar; A: alcance da dependência espacial (m); IDE: índice de dependência espacial; e R²: coeficiente de determinação múltipla do ajuste.

Para a profundidade de 0,15-0,30 m, a condutividade hidráulica determinada no permeâmetro de carga decrescente, os atributos areia total e argila, bem como a porosidade total e a macroporosidade apresentaram EPP. Já a condutividade hidráulica no permeâmetro de carga constante, se ajustou aos modelos exponencial e esférico. O silte, densidade do solo e a microporosidade também se ajustaram aos modelos de semivariograma exponencial e esférico. Os semivariogramas para estes atributos podem ser observados na figura 2.

Vieira (2000) sinaliza que o EPP indica a variabilidade aleatória ou não explicada, que pode ser devida a erros de medida e ou microvariações não detectadas, considerando-se a distância de amostragem utilizada, o que indica ausência de estrutura de dependência espacial.

Figura 1. Semivariogramas ajustados para a profundidade de 0-0,15 m: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga decrescente com cilindro volumétrico de 98 cm³ (A) e densidade do solo (B).

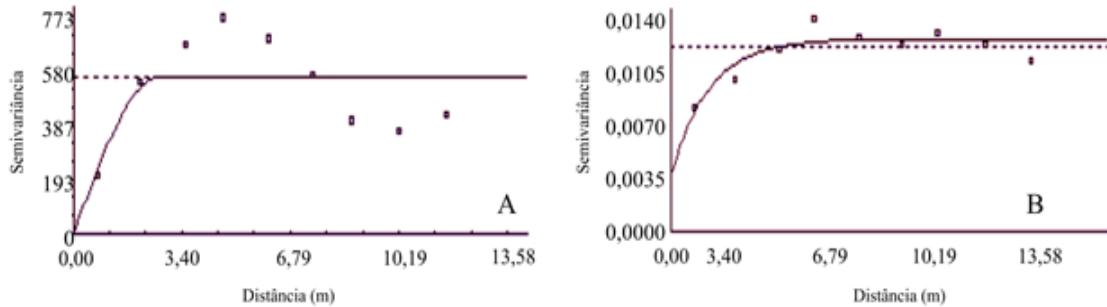
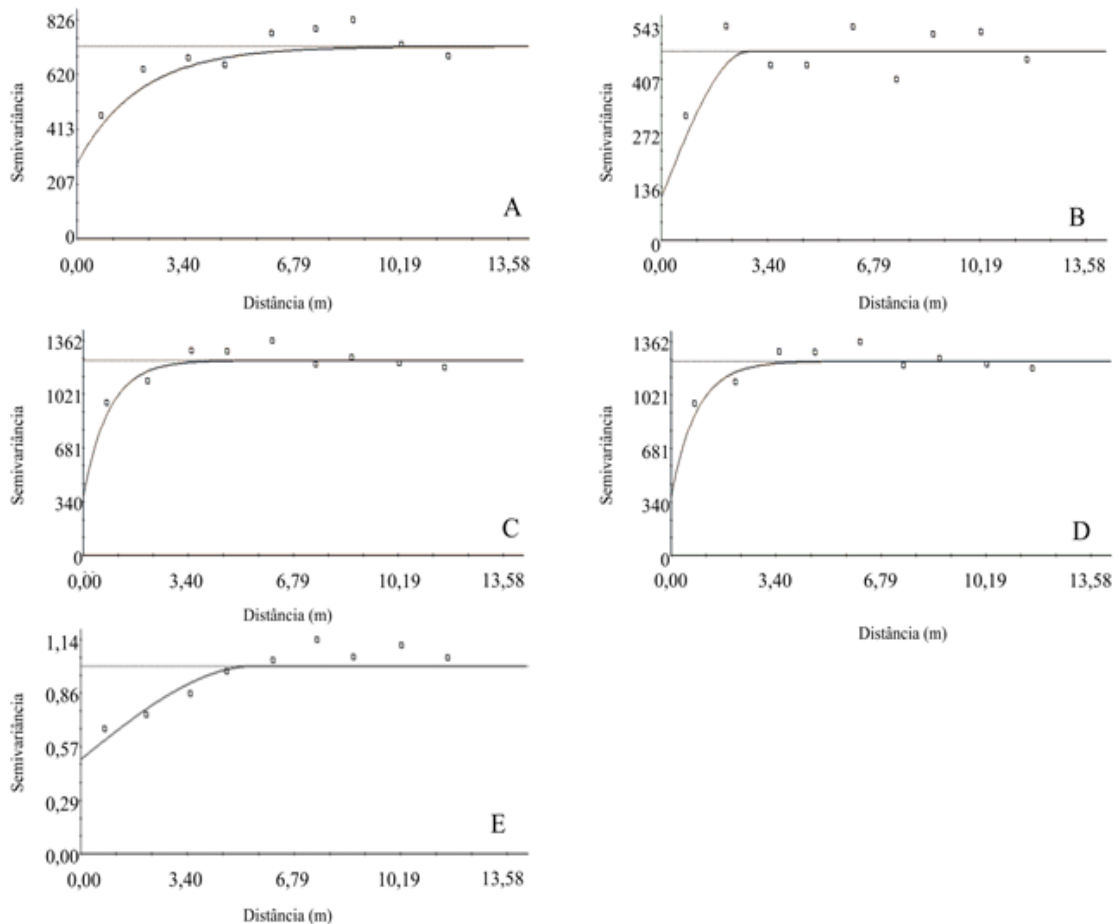


Figura 2. Semivariogramas ajustados para a profundidade de 0,15-0,30 m: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante com cilindro volumétrico de 312 cm³ (A) e de 98 cm³ (B); silte (C); densidade do solo (D); e microporosidade (E).



A variabilidade dos atributos do solo pode ser de origem intrínseca, e possuir forte dependência espacial, sendo causada por alterações naturais no solo, notadamente aquelas de origem pedogenética, como: material de origem, intemperismo de minerais, acúmulo de matéria orgânica e outros.

Utilizando a classificação de Cambardella et al. (1994), a análise do grau de dependência espacial das variáveis na profundidade 0-0,15 m evidenciou que a condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga decrescente apresentou dependência espacial forte $\{[(Co/(Co+C1))] > 75 \%\}$, e a densidade do solo apresentou moderada dependência espacial $\{25 > [(Co/(Co+C1))] < 75 \%\}$. Para a profundidade de 0,15-0,30 m as variáveis condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante, com cilindro volumétrico maior, silte e a microporosidade apresentaram moderada dependência espacial; as variáveis condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante, com cilindro volumétrico menor e densidade do solo demonstraram fraca dependência espacial.

A partir dos ajustes dos semivariogramas foi possível construir os mapas de krigagem, que podem ser observados nas figuras 3 e 4. É possível notar a existência de dependência espacial neste solo que pode estar relacionado com o material de origem e os fatores e processos de formação que atuaram na gênese do mesmo.

Figura 3. Distribuição espacial para a profundidade de 0-0,15 m: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga decrescente com cilindro volumétrico de 98 cm³ (A) e densidade do solo (B).

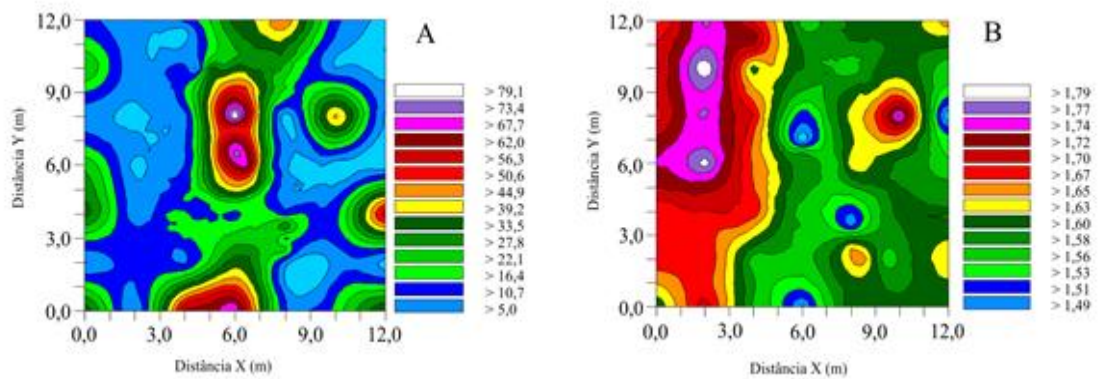
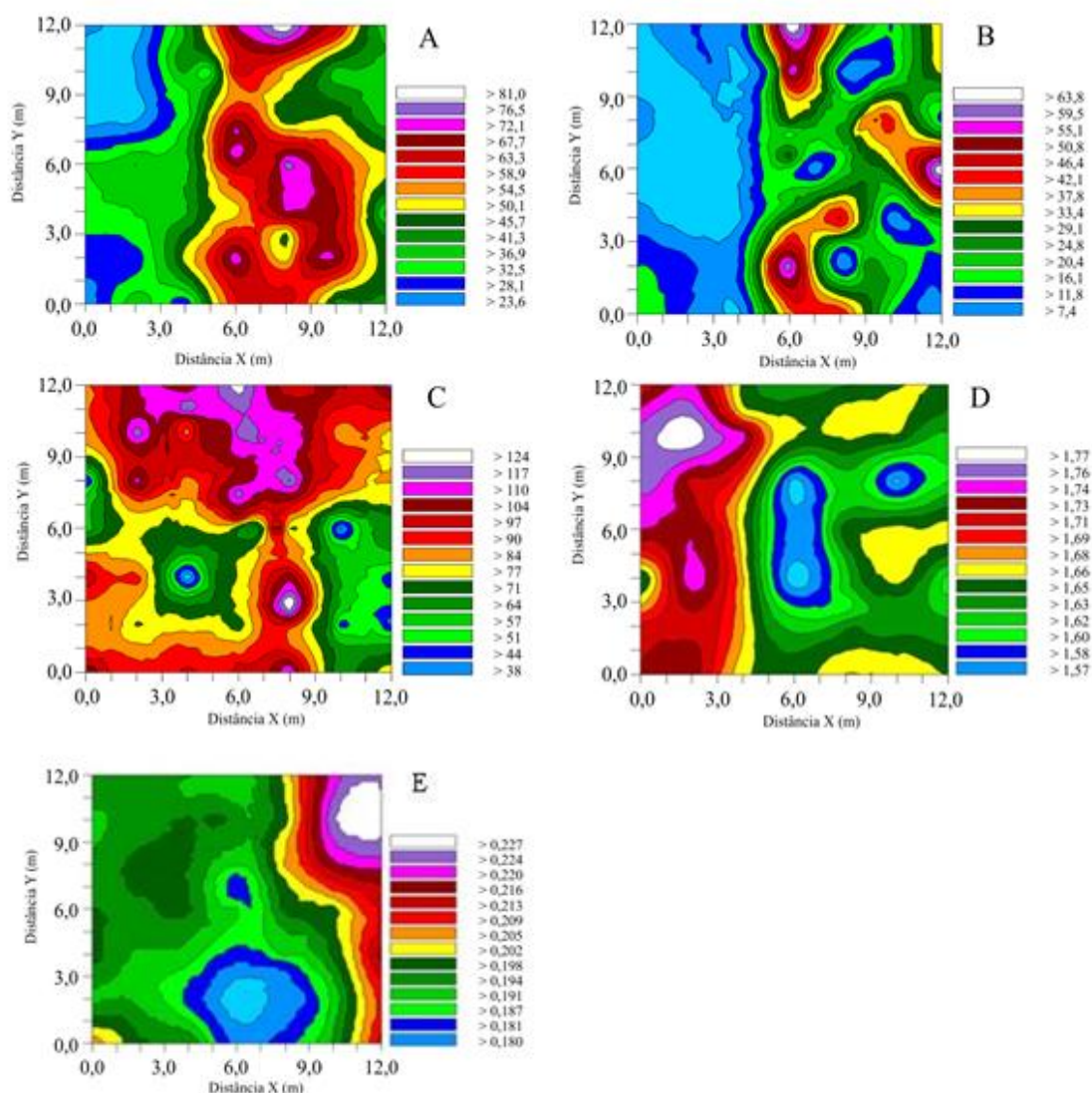


Figura 4. Distribuição espacial para a profundidade de 0,15-0,30 m: condutividade hidráulica determinada em permeâmetro de carga constante com cilindro volumétrico de 312 cm³ (A) e de 98 cm³ (B); silte (C); densidade do solo (D) e microporosidade (E).



6 CONCLUSÕES

Para a profundidade de 0-0,15 m a condutividade hidráulica determinada no permeâmetro de carga constante no cilindro de volume maior apresentou menor coeficiente de variação, indicando uma melhor representatividade das amostras.

A densidade do solo apresentou índice de dependência espacial moderada, com alcance de 1,22 m e semivariograma tipo esférico para a profundidade de 0-0,15m; para a profundidade de 0,15-0,30 o índice de dependência espacial foi forte, com alcance de 1,54 m e semivariograma tipo exponencial.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, O. A. **Informações meteorológicas do CNP**: mandioca e fruticultura tropical. Cruz das Almas: Embrapa – CNPMF, 1999. 35 p. (Documentos, 34).

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 415-422, 2007.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVACK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KNOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Estados Unidos, v. 58, p. 1240-1248, 1994.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, Santiago, v. 25, n. 1, p. 51-56, 1997.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+ for windows**: demonstration version. Michigan: Gamma Design Software, 2000.

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 4: physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-294. (SSSA Book Series, 5).

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 4: physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 201-228. (SSSA Book Series, 5).

HILLEL, D. **Soil water**: physical principles and processes. New York: Academic Press, 1971. 288 p.

KAMIMURA, K. M.; SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, T. G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 877-888, 2013.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 1-12, 1996.

LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, 2006.

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa toposequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

MESQUITA, M. G. B. F. **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. 2001. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 39, p. 197-200, 1968.

SANTOS, K. S. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT user's guide**. 4. ed. Raleigh: SAS Institute Inc., 2004. v. 9, 846 p.

SILVA, E. B.; LIBARDI, P. L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 525-529, 2000.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SOUZA, L. C. **Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semiárido paraibano**. 1999. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, Í. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

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, 1980. p. 319-344.

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. cap. 4, p. 161-207.