



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p439-448>

Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodossolo Humilúvico

Glecio M. Siqueira¹, Jucicléia S. da Silva², Joel M. Bezerra²,
Ênio F. de F. e Silva², Jorge Dafonte Dafonte³ & Ralini F. de Melo²

¹ Centro de Ciências Agrárias e Ambientais/Universidade Federal do Maranhão. Chapadinha, MA. E-mail: gleciosiqueira@hotmail.com (Autor correspondente)

² Departamento de Engenharia Agrícola/Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE. E-mail: jucicleiass@gmail.com; joel_medeiros@oi.com.br; enio.silva@deagri.ufrpe.br; ralini@uag.ufrpe.br

³ Departamento de Ingeniería Agroforestal/Escuela Politécnica Superior. Lugo, Espanha. E-mail: jorge.dafonte@usc.es

Palavras-chave:

geoestatística
física do solo
amostragem do solo

RESUMO

A hipótese intrínseca é, normalmente, a mais utilizada por ser menos restritiva; quando comparada com as demais hipóteses da geoestatística exige apenas a existência de estacionariedade do semivariograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita. O objetivo deste trabalho foi avaliar a estacionariedade de dados de umidade em um Espodossolo Humilúvico. Os dados foram coletados em um transecto contendo 128 pontos, espaçados a cada 3 m. O conteúdo de água no solo foi determinado nas camadas de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m. A análise estatística demonstrou que os dados apresentaram distribuição de frequência lognormal. Os valores de umidade variaram com as variações de relevo. Houve estacionariedade do semivariograma para as três profundidades estudadas. A análise de fragmentos do transecto apresentou estabilidade da média e do semivariograma confirmando que a estacionariedade é muito mais exceção do que regra pois, como um todo, os dados também apresentaram semivariogramas bem definidos e sem tendência.

Key words:

geostatistics
soil physics
soil sampling

Stationarity of the soil water content of a Humiluvic Spodosol

ABSTRACT

The intrinsic hypothesis is usually the most utilized because it is less restrictive compared to the other hypotheses of the geostatistics, requires only the existence and stationarity of the semivariogram, without any restriction as to the existence of finite variance. The objective of this study was to evaluate the stationarity of humidity data in a Humiluvic Spodosol. Data were collected on a transect containing 128 points, spaced every 3 m. The soil water content was determined in the layers of 0-0.2 m, 0.2-0.4 m and 0.4-0.6 m. Statistical analysis demonstrated that the data presented lognormal frequency distribution. The moisture values varied with signage variations. There was stationarity of the semivariogram for the three studied depths. The analysis of fragments of the transect had stability of mean and semivariogram, confirming that stationarity is much more exception than rule, because the data as a whole also showed semivariograms well defined and without tendency.

INTRODUÇÃO

As análises geoestatísticas possibilitam o entendimento, observação, modelagem e o mapeamento da variabilidade espacial dos mais diversos atributos; sua utilização está vinculada ao conhecimento da localização das amostras ou à regionalização, possibilitando a modelagem espacial entre os pares de dados.

A hipótese intrínseca da geoestatística é, em geral, a mais utilizada por ser a menos restritiva (David, 1977; Chilès & Delfiner, 1999; Vieira, 2000; Webster, 2000; Nielsen & Wendroth, 2003; Marchant et al., 2009; Siqueira et al., 2011; Lark, 2012). Esta hipótese exige apenas a existência e a estacionariedade do semivariograma sem qualquer restrição quanto à existência de variância finita (Vieira, 2000). De acordo com Siqueira et al. (2011) a presença de estacionariedade dos dados é muito mais exceção do que mesmo regra, haja vista que os valores de determinado atributo são, ao longo da paisagem, condicionados por diferentes fatores perdendo, assim, sua “natureza intrínseca”, de vez que a função matemática que representa uma variável está intimamente relacionada à sua regionalização.

De acordo com Kim (1990) e Vieira (2000) variáveis regionalizadas apresentam caráter aleatório visto que consiste em variações altamente irregulares e imprevisíveis e um aspecto estruturado que, neste caso, é representado pela existência de variância finita dos dados, permitindo o ajuste do semivariograma. Journel & Huijbregts (1978) descrevem que uma variável regionalizada é inteiramente descritiva e que não envolve interpretação probabilística alguma. Verifica-se, então, a importância de se compreender como uma variável aleatória se comporta espacialmente uma vez que na hipótese intrínseca a modelagem matemática dos dados é representável em qualquer posição do campo, sendo indiferente ao esquema de amostragem adotado.

A estacionariedade dos dados permite que um experimento possa ser repetido de vez que considera que todas as amostras são diferentes realizações da mesma função aleatória. De acordo com Honarkhah & Caers (2012) a variação espacial é estacionária apresentando estrutura e escala de padrões, não sendo formada apenas por variações. Yamamoto descreve, ainda, que a mesma deve se reconhecer em todas as partes do espaço, e o semivariograma é o mesmo, em qualquer lugar do espaço.

Em um estudo sobre a variabilidade espacial e temporal da umidade de um Latossolo Vermelho, Rocha et al. (2005) descrevem que os dados variaram espacialmente; todavia, não há como comprovar estatisticamente a estacionariedade dos dados. Siqueira et al. (2011) encontraram, estudando a estacionariedade da densidade do solo medida por meio da técnica do torrão, com diferentes tamanhos de torrão, estacionariedade para os dados para torrões com maior dimensão (5 e 7 cm), enquanto que para o torrão de menor dimensão (3 cm), não houve estacionariedade da média dos dados. Neste sentido, para se aplicar a hipótese intrínseca da geoestatística em um experimento, é preciso considerar que o fenômeno em estudo é a realização de uma função matemática contínua dentro da área cujo padrão espacial é definido por fatores intrínsecos e extrínsecos.

Siqueira et al. (2013) encontraram, estudando a estacionariedade de dados de rugosidade do solo com diferentes espaçamentos, a estacionariedade do semivariograma caso em

que foi detectada a estacionariedade dos valores de média, da variância e do semivariograma devido às condições controladas do experimento em laboratório.

Diferentes autores descrevem que a estacionariedade é uma questão local, ou seja, no processo de planejamento de um experimento deve-se ter em mente que, indiferente de como as amostras sejam coletadas, elas sempre pertenceram à mesma população (Hamlett et al., 1986; Webster, 2000; Marchant et al., 2009; Siqueira et al., 2011). Por outra parte, Blanco et al. (1995), Terrien et al. (2013) e Ching & Lin (2014) descrevem que um fenômeno é estacionário quando os valores de média e variância forem constantes, podendo haver estacionariedade de cada um dos parâmetros, de maneira independente.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a estacionariedade de dados do conteúdo volumétrico de água no solo em um Espodossolo Humilúvico em Goiana (Pernambuco), amostrado em um transecto em diferentes profundidades e espaçamentos.

MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental está localizada no município de Goiana (Zona da Mata Norte Pernambuco, Brasil), cujas coordenadas são: latitude 07° 34' 25" S e longitude 34° 55' 39" W. O solo da área de estudo é um Espodossolo Humilúvico órtico textura arenosa de acordo com a classificação EMBRAPA (2013) cuja classificação física para a área de estudo é apresentada na Tabela 1 sendo os atributos físicos do solo determinados conforme proposto por Camargo et al. (1986).

A área de estudo possui aproximadamente 6,5 ha, altitude média de 8,5 m e vem sendo manejada nos últimos anos com cana-de-açúcar com queima da palha para colheita (Figura 1). A altitude na área de estudo foi determinada utilizando-se levantamento altimétrico com nível óptico (referencial de altitude tomado com altímetro barométrico), permitindo a construção do mapa de elevação digital (MDE) tendo, como

Tabela 1. Atributos físicos para o Espodossolo Humilúvico órtico textura arenosa presente na área de estudo

Profundidade (m)	Textura (g kg ⁻¹)			Densidade do solo (kg dm ⁻³)	Umidade do solo (m ³ m ⁻³)
	Argila	Silte	Areia		
0-0,3	44	26	930	1,52	0,345
0,3-0,60	43	25	932	1,54	0,368
0,6-1	44	26	930	1,60	0,426
> 1 m	32	40	928	1,66	0,472

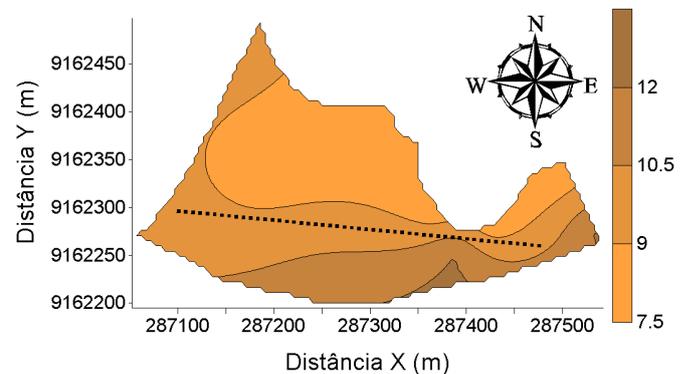


Figura 1. Mapa de elevação digital da área de estudo e esquema de localização do transecto de amostragem contendo 128 pontos de amostragem

base, 90 pontos de amostragem distribuídos ao acaso na área de estudo.

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas média anual variando em torno de 24 °C.

No dia 10/01/2013, o conteúdo volumétrico de água no solo foi determinado em três profundidades (0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m de profundidade), em um transecto contendo 128 pontos de amostragem com espaçamento de 3 m (Figura 1). A Figura 2 apresenta a precipitação sobre a área de estudo no momento da realização das amostragens.

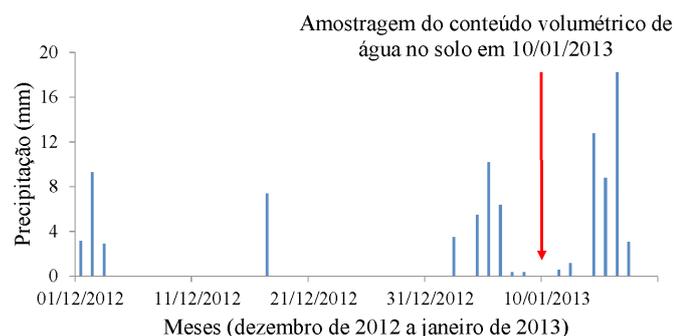


Figura 2. Precipitação diária sobre a área de estudo no período de dezembro de 2012 a janeiro de 2013

O conteúdo volumétrico de água no solo foi determinado através de um equipamento TLO (Transmisión line oscillator - Modelo Hydrosense® Campbell Scientific Austrália Pty. Ltd.). Na técnica de TLO um sinal eletromagnético é emitido por meio de uma sonda no solo e é contabilizado o número de vezes que o sinal retorna em certo período de tempo.

Os dados de umidade volumétrica do solo e de altitude foram analisados por meio da estatística descritiva e de ferramentas de geoestatísticas. O software GEOSTAT foi utilizado para se determinar os principais momentos estatísticos e empregado para determinação da dependência espacial entre amostras. O semivariograma experimental dos dados foi utilizado para determinar a variabilidade e dependência espacial das amostras da umidade do solo, de acordo com Vieira (2000). Uma vez detectada a variabilidade espacial entre amostras, o semivariograma foi ajustado aos seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0); variância estrutural (C_1) e alcance (a). O grau de dependência espacial (GD - Eq. 1) entre amostras foi determinado conforme descrito por Cambardella et al. (1994), sendo baixa (75-100%), média (25-75%) e alta (0-25%):

$$GD = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

Para se comprovar a presença de estacionariedade dos dados ao longo do transecto foram construídos gráficos de dispersão com o objetivo de se verificar padrões de comportamento similares entre os dados para as diferentes profundidades e esquemas de amostragem. Quando identificados distintos padrões de variabilidade ao longo do transecto, os dados foram analisados individualmente para se compreender a magnitude das diferenças entre cada um dos compartimentos identificados;

posteriormente, os dados medidos no espaçamento de 3 m entre amostras foram reclassificados objetivando-se verificar a estacionariedade com diferentes números de amostras (Nielsen & Wendroth, 2003), por meio da modificação do espaçamento resultando em transectos com os seguintes espaçamentos: 3, 6, 9, 12 e 15 m entre amostras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística (Tabela 2) demonstra que os todos os dados em estudo possuem distribuição de frequência do tipo log-normal, conforme demonstrado pelos valores do coeficiente de assimetria, do coeficiente de curtose e do teste de Kolmogorov-Smirnov (D) com 0,01 de probabilidade.

A variância dos dados é elevada quando comparada com dados de outros autores (Reichardt & Timm, 2004; Siqueira et al., 2008). No entanto, verifica-se que as diferenças entre os valores mínimo e máximo são semelhantes para as três camadas de solo. Na camada mais profunda ocorre uma ligeira diminuição do valor de variância, fato que pode ser explicado pela maior homogeneidade do conteúdo de água nesta camada do solo.

De acordo com Reichardt & Timm (2004) se todas as amostras pertencessem à mesma população, os valores de média e de variância teriam que ser iguais indicando algum tipo de equilíbrio estável. No presente trabalho os valores de média e variância não são iguais porém muito próximos, indicando haver um equilíbrio entre as amostras e a presença da estacionariedade dos dados do conteúdo de água no solo, nas três camadas em estudo. Por outra parte, Stevens et al. (2015) descrevem que a estacionariedade é um fenômeno apenas dependente da média.

Todos os dados apresentaram valores elevado de coeficiente de variação (CV), conforme a classificação de Warrick & Nielsen (1980): $CV \leq 12\%$, baixo; $CV 12-60\%$, médio; $CV \geq 60\%$, elevados. Os dados de altitude (m) apresentaram valor mediano de CV (40,65%).

Os dados da Figura 3 confirmam a estabilidade dos valores de umidade volumétrica do solo, medida por meio da técnica TLO. O comportamento dos valores do conteúdo de água no solo ao longo do transecto é semelhante para as três camadas em estudo porém se deve ter em mente que a área em estudo é irregular e que o conteúdo de água no solo está condicionado aos processos de redistribuição de água no solo sendo o relevo

Tabela 2. Parâmetros estatísticos para o conteúdo volumétrico de água no solo (%) para o transecto contendo 128 pontos de amostragem

Parâmetros estatísticos	Umidade (%)			Altitude (m)
	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0,4-0,6 m	
Número de pontos	128	128	128	128
Mínimo	1,00	1,30	1,50	1,31
Máximo	51,50	51,50	48,90	7,56
Média	13,17	14,21	13,85	4,50
Variância	198,239	195,742	182,892	3,359
Desvio padrão	14,07	13,99	13,52	1,83
CV (%)	106,8	98,40	97,60	40,65
Assimetria	1,225	1,151	1,170	-0,205
Curtose	0,286	0,105	0,140	-1,386
D	0,244Ln	0,226Ln	0,248Ln	0,142Ln

CV - Coeficiente de variação, D - Desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov com probabilidade de erro de 0,01

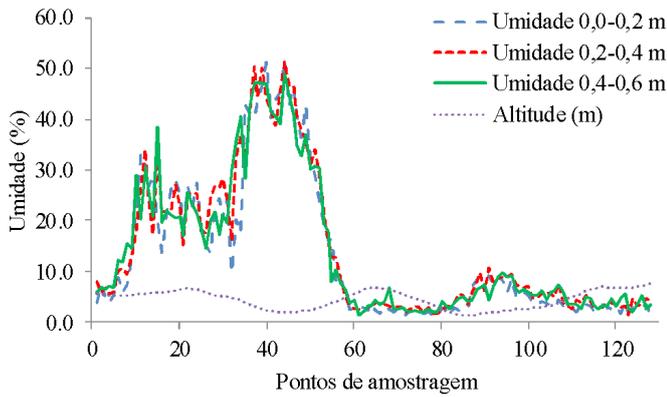


Figura 3. Distribuição do conteúdo volumétrico de água no solo (%) e da altitude (m) ao longo dos 128 pontos de amostragem

um fator de extrema importância (Reichardt & Timm, 2004; Siqueira et al., 2008).

A matriz de correlação linear (Tabela 3) demonstrou que a correlação entre o conteúdo volumétrico de água no solo (%) e a altitude (m) foi baixa apresentando relação inversa, ou seja, com o aumento da altitude menores os valores de umidade volumétrica. Siqueira et al. (2008) descrevem a relação inversa entre o conteúdo de água no solo e a altitude em um estudo sobre variabilidade espacial.

O conteúdo de água apresentou, no solo, nos compartimentos A e B, normalidade dos dados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 4). Verificou-se diminuição acentuada dos valores de variância para o compartimento B enquanto que para o compartimento A os valores de variância aumentaram quando comparados com a análise inicial dos 128 pontos de amostragem (Tabela 2). A análise da altitude (Figuras 1 e 3) ao longo do transecto demonstra que no compartimento A ocorre uma variação maior dos valores de altitude favorecendo com que os valores do conteúdo de água no solo neste compartimento sejam mais variáveis.

Tabela 3. Matriz de correlação linear entre os atributos em estudo nos 128 pontos de amostragem

	Umidade			Altitude (m)
	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0,4-0,6 m	
Umidade 0-0,2 m	1,000			
Umidade 0,2-0,4 m	0,964	1,000		
Umidade 0,4-0,6 m	0,940	0,977	1,000	
Altitude (m)	-0,280	-0,284	-0,267	1,000

Os dados da Tabela 4 demonstram diminuição dos valores de coeficiente de variação (CV) quando comparados com os dados originais; já o compartimento A apresenta valores elevados de CV enquanto o compartimento B apresenta valores de CV medianos. Os maiores valores de CV para o compartimento A se devem ao fato de que, a partir do ponto 60 (Figura 4A) ocorre um aumento do relevo e mesmo que sejam pequenas as diferenças nas cotas, tal diferença atua consideravelmente sobre a manifestação dos valores de umidade do solo.

A análise do gráfico de dispersão para os compartimentos A e B (Figura 4) confirma a relação do conteúdo de água no solo com a altitude demonstrando que as menores variações dos valores de umidade ocorrem no compartimento A, estando os dados deste compartimento mais homogêneos quando comparados aos dados do compartimento B.

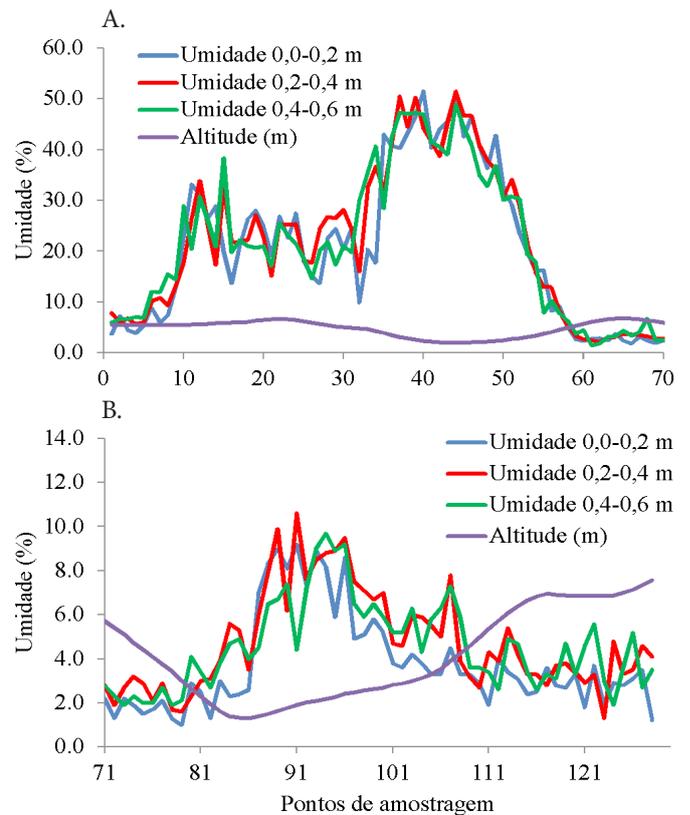


Figura 4. Distribuição do conteúdo volumétrico de água no solo (%) e da altitude (m) ao longo dos dois compartimentos em estudo (A: pontos de 1 a 70; B: pontos de 71 a 128)

Tabela 4. Parâmetros estatísticos para o conteúdo de água no solo para os dois compartimentos em estudo (A: pontos de 1 a 70; B: pontos de 71 a 128)

Parâmetros estatísticos	Compartimento A				Compartimento B			
	Ponto 01 ao 70				Ponto 71 ao 128			
	(m)				(m)			
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	Altitude	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	Altitude
Número de pontos	70	70	70	70	58	58	58	58
Mínimo	1,80	2,10	1,50	1,99	1,00	1,30	1,90	1,31
Máximo	51,50	51,50	48,90	6,82	9,20	10,60	9,70	7,56
Média	20,94	22,05	21,53	4,82	3,80	4,75	4,57	4,13
Variância	225,678	218,509	201,132	2,469	5,021	5,202	4,019	4,224
Desvio padrão	15,02	14,78	14,18	1,57	2,24	2,28	2,00	2,05
CV (%)	71,74	67,03	65,85	32,59	58,97	47,95	43,79	49,00
Assimetria	0,383	0,29	0,326	-0,63	1,176	0,804	0,722	0,257
Curtose	-1,019	-1,031	-1,023	-1,022	0,397	-0,17	-0,061	-1,449
D	0,112n	0,097n	0,117n	0,197Ln	0,207n	0,147n	0,118n	0,137n

CV - Coeficiente de variação (%); D - Desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov com probabilidade de erro de 0,01

O compartimento B apresenta maior diferenciação entre os valores máximo e mínimo (Tabela 4), quando comparado ao compartimento A. Este fato é justificado pela diferença no perfil altimétrico, que faz com que ocorra uma variação maior nos valores do conteúdo volumétrico de água (Reichardt & Timm, 2004, Marchant et al., 2009).

Os dados da Tabela 5 descrevem que o compartimento A apresenta maiores valores de correlação linear quando comparados com os do compartimento B; entretanto, vale ressaltar que em ambos os compartimentos é clara a relação inversa entre o conteúdo de água no solo e a altitude.

A análise geostatística demonstrou a estabilidade do semivariograma tanto para o número total de pontos quanto para os compartimentos A e B (Tabela 6); no entanto, tal fato ocorreu em diferentes escalas. Com o número total de medições os dados do conteúdo volumétrico de água se ajustaram ao modelo esférico e com a diminuição do número de pontos com o aumento do espaçamento os dados se ajustaram ao modelo gaussiano. Diversos autores descrevem o modelo esférico como o mais comum aos dados de solo e planta (Vieira, 2000; Rocha et al., 2005; Siqueira et al., 2008)

Todos os esquemas de amostragem estudados apresentaram baixos valores de efeito pepita (C_0) indicando boa representatividade e acurácia dos parâmetros de ajuste do semivariograma. Para o compartimento A ocorre um ligeiro aumento dos valores de efeito pepita (C_0), com consequente diminuição dos valores de alcance (a). Tal fato se deve à maior

Tabela 5. Matriz de correlação linear para o Compartimento A (pontos de 1 a 70) e B (pontos de 71 a 128)

	Umidade			Altitude (m)
	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0,4-0,6 m	
Compartimento A (1 a 70 pontos)				
Umidade 0-0,2 m	1,000			
Umidade 0,2-0,4 m	0,937	1,000		
Umidade 0,4-0,6 m	0,895	0,963	1,000	
Altitude (m)	-0,728	-0,735	-0,720	1,000
Compartimento B (71 a 128)				
Umidade 0-0,2 m	1,000			
Umidade 0,2-0,4 m	0,881	1,000		
Umidade 0,4-0,6 m	0,771	0,804	1,000	
Altitude (m)	-0,504	-0,537	-0,477	1,000

Tabela 6. Parâmetros de ajuste do semivariograma para o conteúdo de água no solo (%) nos 128 pontos de amostragem e para os dois compartimentos em estudo (A: pontos de 1 a 70; B: pontos de 71 a 128)

Camada	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	GD
Pontos de 1 a 128					
0-0,2 m	Esférico	3,30	250,20	121,00	1,31
0,2-0,4 m	Esférico	0,10	250,00	121,00	0,04
0,4-0,6 m	Esférico	0,10	232,20	124,00	0,04
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	3,56	29,00	0,00
Compartimento A					
0-0,2 m	Gaussiano	14,70	321,40	54,21	4,57
0,2-0,4 m	Gaussiano	11,00	342,60	64,95	3,21
0,4-0,6 m	Gaussiano	10,60	312,00	62,18	3,39
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	4,38	37,60	0,00
Compartimento B					
0-0,2 m	Gaussiano	0,60	7,49	42,78	8,01
0,2-0,4 m	Gaussiano	0,88	8,70	55,59	10,11
0,4-0,6 m	Gaussiano	0,89	6,75	59,92	13,18
Altitude (m)	Gaussiano	0,15	8,31	61,10	1,80

homogeneidade dos valores de umidade neste compartimento fazendo com que seja necessário um espaçamento menor do que o utilizado para se garantir uma precisão maior (Vieira, 2000; Siqueira et al., 2008; Siqueira et al., 2013).

O compartimento B apresentou não apenas baixos valores de C_0 mas também a precisão do experimento, em que foram encontrados valores de alcance próximos aos encontrados no compartimento A, sendo que cada um dos 128 pontos possui uma distância de cerca da metade do esquema de amostragem original (Tabela 6). O fato do compartimento A apresentar maior variabilidade espacial, não detectada durante o processo de amostragem, é confirmado pelos valores de CV (Tabela 4), quando comparados com os do compartimento B, que apresenta valores de CV mais baixos. A semelhança entre amostras faz com que os valores de alcance diminuam, estando em torno de 52,76 m.

As Figuras 5 e 6 apresentam os semivariogramas escalonados para os atributos em estudo. A Figura 5 demonstra que a relação espacial entre as amostras é clara para as três profundidades de vez que o crescimento dos pares de semivariância é contínuo e similar, sem ocorrência de maiores diferenças. Na Figura 6 verifica-se comportamento distinto dos pares de semivariância do conteúdo volumétrico de água no solo em relação à altitude.

Verifica-se a continuidade do padrão de variabilidade entre os pares de semivariância (Figura 7); entretanto, a camada superficial (0,0-0,2 m) apresenta diferenciação para os dois casos, a partir dos pares iniciais de semivariância. Neste caso, a altitude não é o fator primordial que influencia a manifestação deste parâmetro e, sim, fatores externos, ligados ao clima, uma vez que no período das amostragens a cana-de-açúcar na área de estudo estava em processo de desenvolvimento não oferecendo dossel suficiente para contribuir em minimizar os efeitos dos atributos do clima sobre a área de estudo.

Goovaerts (2011) descreve que valores de média constante e número de pares de semivariância iguais, resultam na estacionariedade do semivariograma confirmando a presença de estacionariedade para os semivariogramas escalonados (Figura 7).

A Figura 7C demonstra que os dados de altitude apresentam anisotropia, visto que, ao longo do transecto, os semivariogramas demonstram diferentes distribuições quando se analisam os compartimentos A e B em relação ao transecto original. Neste caso, verifica-se a presença de anisotropia zonal

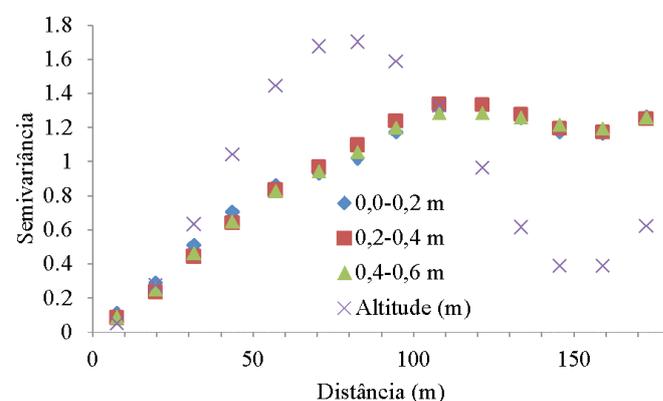


Figura 5. Semivariograma escalonado para o conteúdo volumétrico de água no solo (%) ao longo dos 128 pontos de amostragem

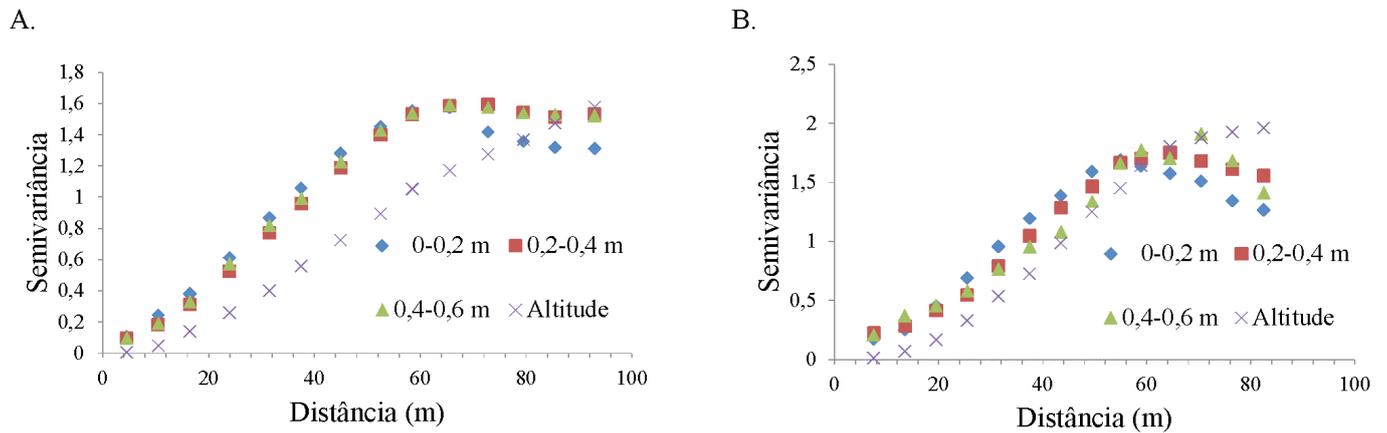


Figura 6. Semivariogramas escalonados para o conteúdo volumétrico de água no solo (%) nos dois compartimentos em estudo (A: pontos de 1 a 70; B: pontos de 71 a 128)

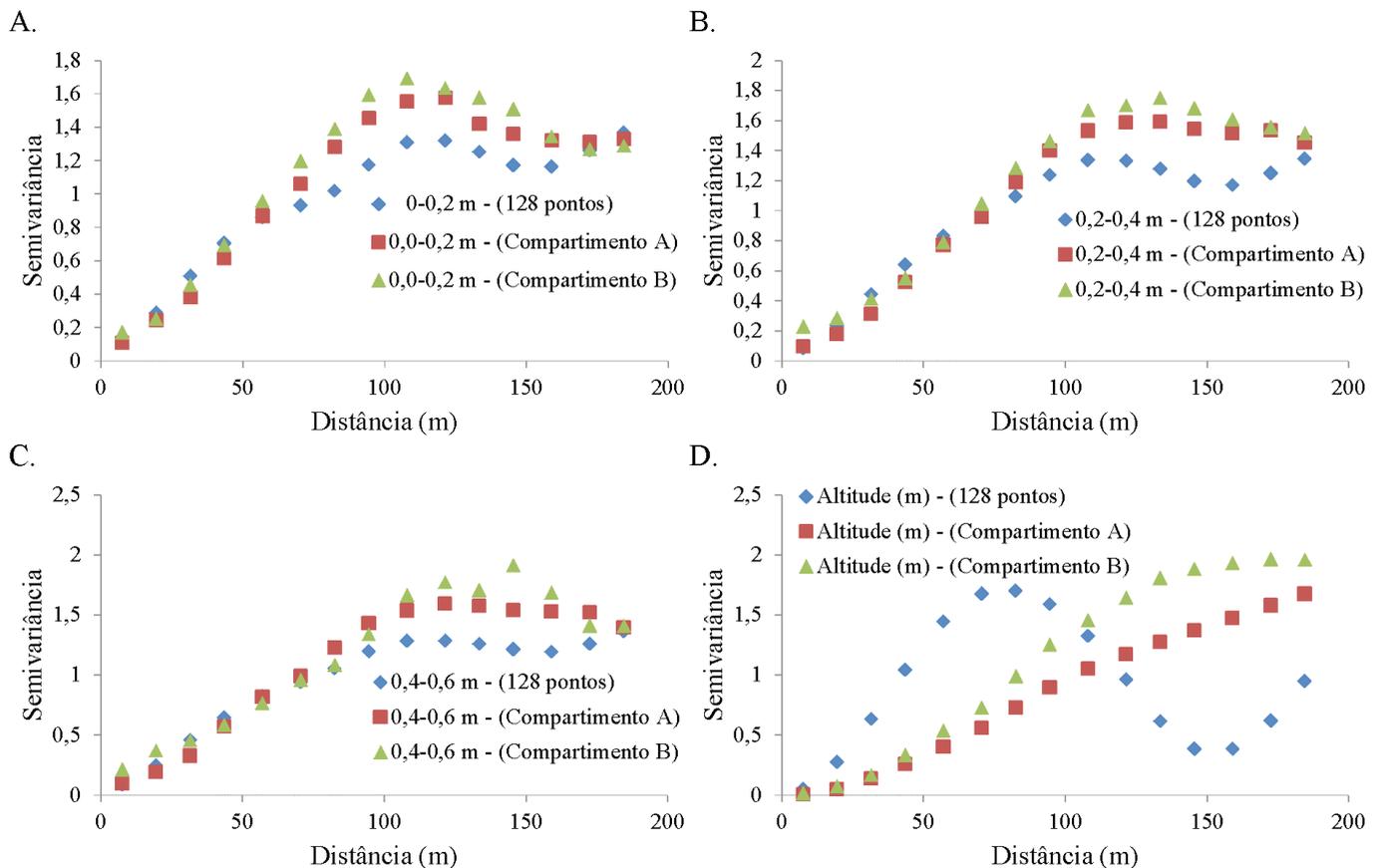


Figura 7. Semivariogramas escalonados para o conteúdo volumétrico de água no solo: 0-0,2 m (A), 0,2-0,4 m (B), 0,4-0,6 m (C) e altitude (D), medidos nos 128 pontos de amostragem e nos compartimentos (A e B)

que, de acordo com Yamamoto (2001) a amplitude dos dados é constante havendo diferentes valores de patamares ($C_0 + C_1$). Os valores de patamar para a altitude no compartimento A é de 4,38, enquanto que para o compartimento B o patamar é de 8,31 (Tabela 6 e Figura 7C). Para o presente estudo a anisotropia ocorre num ângulo de 90°, uma vez que o transeito cruza a área, na sua maior dimensão.

A análise dos gráficos de dispersão dos dados com diferentes espaçamentos (Figura 8) corrobora com a hipótese de estacionariedade dos dados exposta até o momento. Nota-se que, à medida que o espaçamento entre amostras é aumentado (3, 6, 9, 12 e 15 m) ocorre uma suavização dos dados mas se observa que no compartimento A é onde perde a maior parte da informação, sempre que o espaçamento entre amostras é aumentado.

As análises estatísticas para os dados com diferentes espaçamentos não apresentaram resultados significantes apresentando-se, a seguir, apenas os resultados de média (Figura 9) e variância (Figura 10) que são os dois momentos estatísticos de maior relevância para a análise da estacionariedade, conforme descrito por Lark (2012), Terrien et al. (2013) e Ching & Lin (2014). Ressalta-se que o teste de comparação de média por meio do teste de Tukey com 1 % de probabilidade não apresentou diferenciação nas médias dos dados apresentados nas Figuras 9 e 10.

As Figuras 9A e 10A demonstram que na camada superficial (0,0-0,2 m) há uma diminuição dos valores de média e variância com a diminuição do número de amostras; no entanto, com 26 pontos espaçados a cada 15 m os valores de média e variância

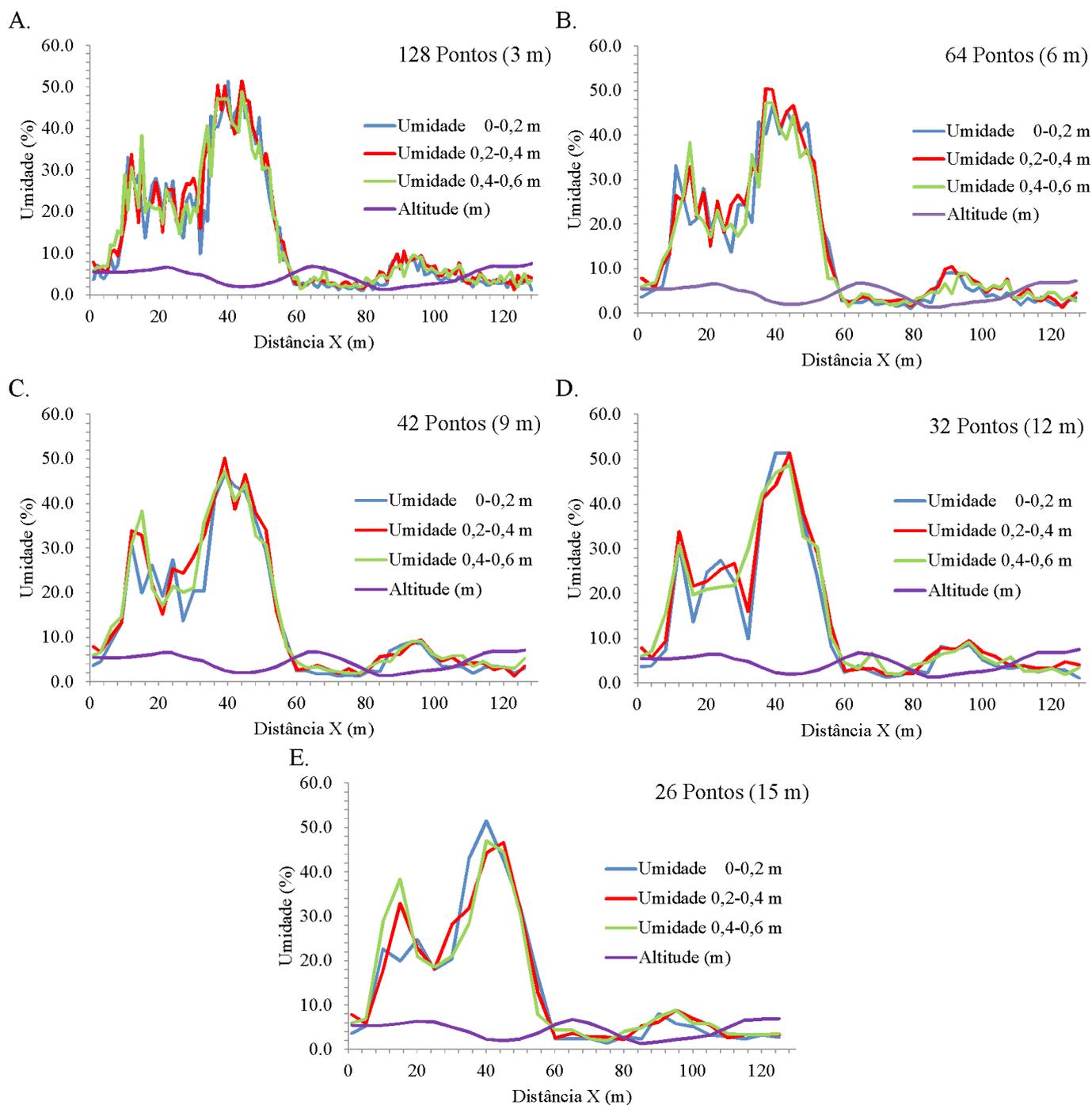


Figura 8. Distribuição do conteúdo volumétrico de água no solo (%) e da altitude (m) ao longo dos diferentes esquemas de amostragem: (A) 128 pontos (3 m entre pontos); (B) 64 pontos (6 m entre pontos); (C) 42 pontos (9 m entre pontos); (D) 32 pontos (12 m entre pontos); (E) 26 pontos (15 m entre pontos)

aumentam consideravelmente quando comparados aos dados originais (Figuras 9D e 10D). Tratando-se de dados de umidade volumétrica do solo, uma pequena diferença entre os valores acarreta em um volume de água considerável, devido à magnitude deste atributo.

As Figuras 9B, 9C, 10B e 10C apresentam padrão similar com relação à média e variância dos dados mas ainda existem diferenças consideráveis com o aumento do espaçamento e diminuição do número de pontos utilizados no estudo porém em menor intensidade, quando comparada com a camada superficial (0,0-0,2 m). Esperava-se que nas camadas de 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m de profundidade houvesse uma similaridade maior dos valores de média e variância uma vez que esta

camada do solo sofre pouca influência dos agentes climáticos, sendo que as diferenças podem ser justificadas pela relação com a altitude e com características intrínsecas ao solo.

Os parâmetros de ajuste do semivariograma para o transecto com diferentes espaçamentos [128 pontos (3 m entre pontos); 64 pontos (6 m entre pontos); 42 pontos (9 m entre pontos); 32 pontos (12 m entre pontos); 26 pontos (15 m entre pontos)] demonstram que os dados de altitude se ajustaram ao modelo gaussiano (Tabela 7), apresentando anisotropia zonal.

Os dados de umidade do solo (Tabela 7) demonstraram haver estabilidade dos parâmetros de ajuste do semivariograma nas diferentes profundidades (0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m) e para os diferentes espaçamentos (3, 6, 9, 12 e 15 m). No

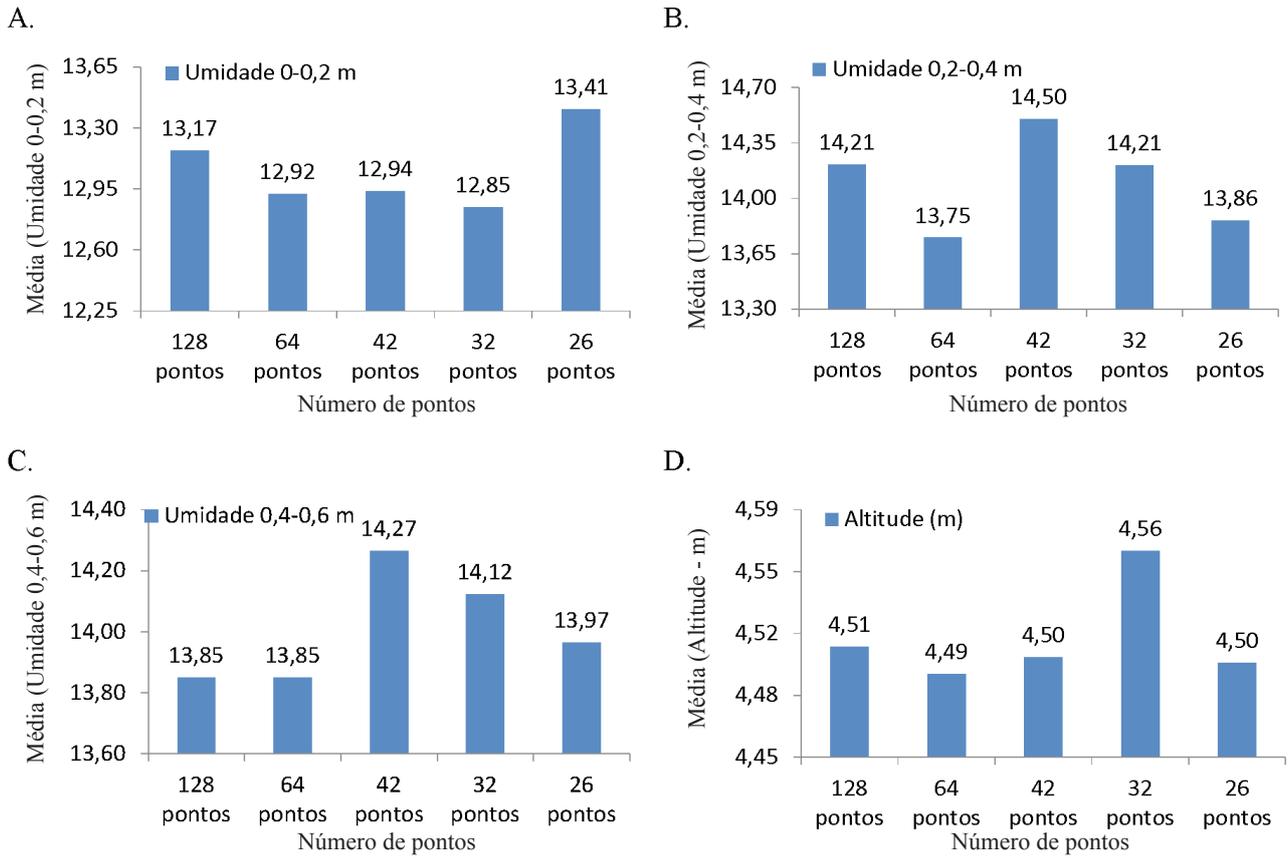


Figura 9. Valores de média para os atributos em estudo e para os diferentes esquemas de amostragem: (A) 128 pontos (3 m entre pontos); (B) 64 pontos (6 m entre pontos); (C) 42 pontos (9 m entre pontos); (D) 32 pontos (12 m entre pontos); (E) 26 pontos (15 m entre pontos)

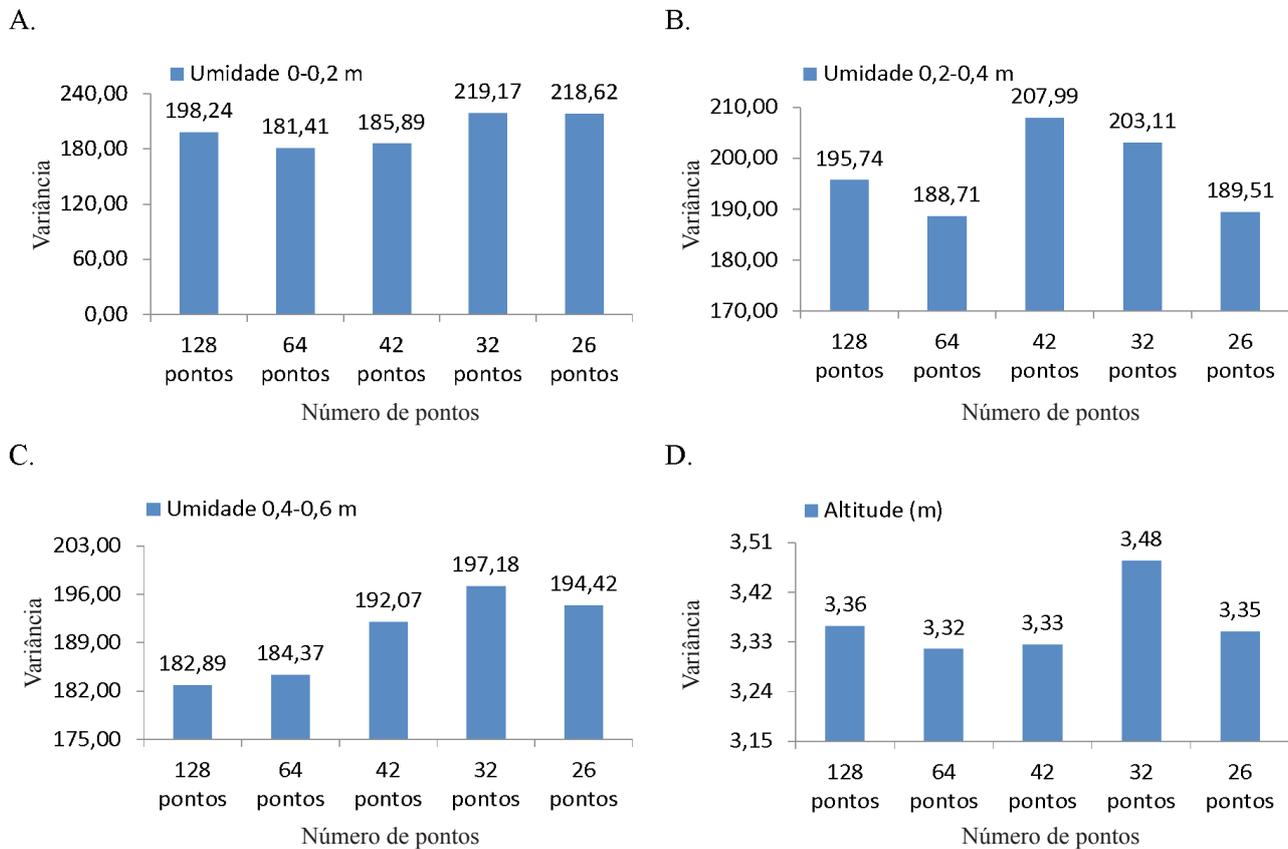


Figura 10. Valores de variância para os atributos em estudo e para os diferentes esquemas de amostragem: (A) 128 pontos (3 m entre pontos); (B) 64 pontos (6 m entre pontos); (C) 42 pontos (9 m entre pontos); (D) 32 pontos (12 m entre pontos); (E) 26 pontos (15 m entre pontos)

entanto, verifica-se a presença de anisotropia mista. De acordo com Yamamoto (2001) a anisotropia mista ocorre quando se encontram diferentes valores de alcance (a) e de patamar. Para o estudo em questão e mesmo com a presença de anisotropia mista para os dados do conteúdo volumétrico de água, é possível verificar a estacionariedade do semivariograma uma vez que todos os dados se ajustaram ao modelo esférico.

O grau de dependência espacial (GD, Tabela 7) é elevado para todos os dados nas diferentes profundidades (0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m) e para os diferentes espaçamentos (3, 6, 9, 12 e 15 m), conforme a classificação de Cambardella et al. (1994). Tal fato é importante, pois mesmo com o maior espaçamento entre amostras foi possível detectar a variabilidade espacial por meio do semivariograma e com elevada dependência espacial entre amostras.

Tabela 7. Parâmetros de ajuste do semivariograma para o conteúdo de água no solo (%) e a altitude (m) para os diferentes esquemas de amostragem: 128, 64, 42, 32 e 26 pontos

Camada	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	GD
128 pontos					
0-0,2 m	Esférico	3,30	250,20	121,00	1,31
0,2-0,4 m	Esférico	0,10	250,00	121,00	0,04
0,4-0,6 m	Esférico	0,10	232,20	124,00	0,04
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	3,562	29,00	0,00
64 pontos					
0-0,2 m	Esférico	0,10	249,10	121,70	0,04
0,2-0,4 m	Esférico	0,10	253,70	120,00	0,04
0,4-0,6 m	Esférico	0,10	225,10	122,10	0,04
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	3,56	28,90	0,28
42 pontos					
0-0,2 m	Esférico	0,10	237,40	120,80	0,04
0,2-0,4 m	Esférico	0,10	265,20	129,70	0,03
0,4-0,6 m	Esférico	0,10	243,90	128,40	0,04
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	3,44	28,10	0,29
32 pontos					
0-0,2 m	Esférico	15,70	267,10	112,10	5,87
0,2-0,4 m	Esférico	0,10	253,40	120,90	0,03
0,4-0,6 m	Esférico	0,10	244,00	124,20	0,04
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	3,64	29,80	0,27
26 pontos					
0-0,2 m	Esférico	0,10	301,50	147,30	0,03
0,2-0,4 m	Esférico	0,10	244,80	148,90	0,04
0,4-0,6 m	Esférico	7,80	249,90	181,10	3,12
Altitude (m)	Gaussiano	0,01	3,27	28,70	0,30

C_0 - Efeito pepita; $C_0 + C_1$ - Patamar; a: Alcance; GD - Grau de dependência

CONCLUSÕES

1. A amostragem foi suficiente para detectar a estabilidade dos dados, ao longo do transecto e nos compartimentos individualizados.

2. A estacionariedade dos dados foi evidenciada indiferente do esquema de amostragem.

3. Evidenciou-se estabilidade da média e dos parâmetros do semivariograma para todos os atributos demonstrando que a estacionariedade é muito mais exceção do que regra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FACEPE – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco, pelo apoio financeiro e concessão de bolsa DCR, ao primeiro autor. Os

autores também agradecem à FAPEMA – Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão, pelo apoio financeiro.

LITERATURA CITADA

- Blanco, S.; Garcia, H.; Quiroga, R. Q.; Romanelli, L. Stationarity of the EEG series. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, v.44, p.395-399, 1995. <http://dx.doi.org/10.1109/51.395321>
- Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p.
- Cambardella, C. A.; Mooman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlem, D. L.; Turvo, R. F.; Konopa, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science of America Journal*, v.47, p.1501-1511, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Chilès, J. P.; Delfiner, P. *Geostatistics – Modeling spatial uncertainty*. New York: Wiley-Interscience Publication, 1999. 695p.
- Ching, J.; Lin, C. J. Probability distribution for mobilized shear strengths of saturated undrained clays modeled by 2-D Stationary Gaussian Random Field-A 1-D stochastic process view. *Journal of Mechanics*, v.30, p.229-239, 2014. <http://dx.doi.org/10.1017/jmech.2014.9>
- David, M. *Geostatistical ore reserve estimation*. New York: Elsevier Scientific, 1977. 364p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- Goovaerts, P. A coherent geostatistical approach for combining choropleth map and field data in the spatial interpolation of soil properties. *European journal of soil science*, v.62, p.371-380, 2011. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01368.x>
- Hamlett, D. L.; Horton, R.; Cressie, N. A. C. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. *Soil Science Society of America Journal*, v.50, p.868-875, 1986. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040008x>
- Honarkhah, M.; Caers, F. Direct pattern-based simulation of non-stationary geostatistical models. *Mathematical Geosciences*, v.44, p.651-672, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s11004-012-9413-6>
- Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 1978. 600p.
- Kim, Y. C. *Introductory geostatistics and mine planning*. Arizona: Department of Mining and Geological Engineering, 1990.
- Lark, R. M. A stochastic geometric model for continuous local trends in soil variation. *Geoderma*, v.189-190, p.661-670, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.005>
- Marchant, B. P.; Newman, S.; Corstanje, R.; Reddy, K.R.; Osborne, T.Z. Lark, R.M. Spatial monitoring of a non-stationary soil property: phosphorus in a Florida water conservation area. *European Journal of Soil Science*, v.60, p.757-769, 2009. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01158.x>
- Nielsen, D. R.; Wendroth, O. *Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation*. Reiskirchen: Catena Verlag GmbH, 2003. 398p.

- Reichardt, K.; Timm, L. C. Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478p.
- Rocha, G. C.; Libardi, P. L.; Carvalho, L. A.; Cruz, A. C. R. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citrus. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.41-50, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100005>
- Siqueira, G. M.; Bezerra, J. M.; Dafonte Dafonte, J.; Vidal Vázquez, E.; Valcarcel Armesto, M. Analysis of geostatistics through roughness data sampling of soil at different scales. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.2, p.019-031, 2013.
- Siqueira, G. M.; Vieira, S. R.; Camargo, M. B. P. Variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas (SP). *Bragantia*, v.67, p.213-223, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000100026>
- Siqueira, G. M.; Vieira, S. R.; Paz González, A.; Dafonte Dafonte, J.; Ceddia, M. B. Análise da hipótese intrínseca da geoestatística utilizando dados de densidade do solo. *Revista de Ciências da Vida*, v.31, p.75-87, 2011.
- Stevens, F.; Bogaert, P.; van Wesemael, B. Spatial filtering of a legacy dataset to characterize relationships between soil organic carbon and soil texture. *Geoderma*, v.237-238, p.224-236, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.005>
- Terrien, J.; Germain, G.; Marque, C.; Karlsson, B. Bivariate piecewise stationary segmentation; improved pre-treatment for synchronization measures used on non-stationary biological signals. *Medical Engineering & Physics*, v.35, p.1188-1196, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.12.010>
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, G.R. (ed.) *Tópicos em Ciência do solo I*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000. 54p.
- 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. 350p. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>
- Webster, R. Is soil variation random? *Geoderma*, v.97, p.149-163, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00036-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00036-7)
- Yamamoto, J. K. (ed.). *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: EDUSP, 2001. 226p.