



ARTIGO ORIGINAL

Ivanildo Amorim de Oliveira¹
Milton César Costa Campos^{2*}
Renato Eleotério de Aquino¹
José Marques Junior¹
Ludmila de Freitas¹
Zigomar Menezes de Souza³

¹Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Departamento Solos e Adubos, Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, Vila Industrial, 14870-900, Jaboticabal, SP, Brasil

²Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Rua 29 de Agosto, 786, Divino Pranto, 69800-000, Humaitá, AM, Brasil

³Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia Agrícola, Departamento de Água e Solo, Avenida Candido Rondon, 501, Barão Geraldo, CP 6011, 13083-875, Campinas, SP, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: mcesarsolos@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Atributos físicos
Krigagem
Variabilidade espacial

KEYWORDS

Physical attributes
Kriging
Spatial variability

Semivariograma escalonado no planejamento amostral da resistência à penetração e umidade de solo com cana-de-açúcar

Scaled semivariogram in the planning sample of resistance to penetration and humidity of the soil with sugarcane

RESUMO: A resistência do solo à penetração é um importante indicador da qualidade física do solo, por ser diretamente relacionada ao crescimento das plantas e de fácil determinação. O objetivo deste trabalho foi investigar a variabilidade espacial da umidade e a resistência do solo à penetração (RSP), em épocas chuvosa e seca, com uso de semivariograma escalonado, além de determinar a densidade amostral mínima para caracterização da variabilidade em solo cultivado com cana-de-açúcar no município de Humaitá-AM. O experimento foi instalado em um Cambissolo Háplico Alítico, sendo os pontos de coleta das amostras estabelecidos por meio de uma malha de 70 x 70 m, amostrando-se nos pontos de cruzamento da malha, utilizando-se espaçamentos regulares de 10 m. A RSP foi avaliada nas profundidades 0,0-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m, e a umidade no solo, na profundidade de 0,0-0,45 m, em épocas chuvosa (mês de janeiro de 2011) e seca (mês de agosto de 2011). Foram realizadas análises exploratórias dos dados e de geoestatística. Houve maior umidade e menor resistência do solo à penetração na época chuvosa, caracterizando a relação entre estes atributos. Na época seca, ocorreu maior variabilidade dos dados quando comparada ao período chuvoso, representada pelo menor alcance e pela maior densidade amostral, com base no alcance do semivariograma e no coeficiente de variação.

ABSTRACT: The soil resistance to penetration (RSP) is an important indicator of physical quality of the soil, to be directly related to the growth of the plants and easy determination. The aimed of this study is investigate the spatial variability of humidity and soil resistance to penetration in period dry and wet with the use of scaled semivariogram and determine the density minimum sample size for characterization of variability in soil cultivated with sugarcane. The experiment was conducted in a Cambisol Haplic, being the points of collection of samples were established by means of a grid of 70 x 70 m, sampling at the crossing points of the grid using regular spacing of 10 to 10 meters. The RSP was measured at depths from 0.0-0.15, 0.15-0.30 and from 0.30-0.45 m and the humidity was determined at depths 0,0-0,45 m in period dry and wet. The data were analyzed with descriptive statistics and geostatistics. There was greater humidity and lower soil resistance to penetration in period wet, characterizing the relationship between these attributes. In the dry period there was greater variability in the data compared to the wet period, represented by the lower range and higher sampling density, based on the range of the semivariogram and coefficient of variation

1 Introdução

Na safra de 2005/06, as lavouras de cana-de-açúcar no Brasil ocuparam aproximadamente seis milhões de hectares, estimando-se a duplicação dessa área até o ano de 2030 (Freitas et al., 2011). A importância social e econômica da cana-de-açúcar se mostra principalmente na produção de álcool (para uso combustível, farmacêutico, etc.) e açúcar. No entanto, na região sul do Amazonas, sua importância está diretamente relacionada à geração de empregos diretos e indiretos, sendo utilizada também na produção de caldo de cana, melaço, rapadura, aguardente e forragem para alimentação animal (Marçal, 2009).

O cultivo dessa cultura vem sofrendo rápido processo de modernização, com o uso cada vez mais frequente de máquinas agrícolas, o que pode estar promovendo alterações nos atributos físicos do solo. O manejo inadequado do solo proporciona alterações nos seus atributos, ocasionando sua degradação, em razão de diversos processos que levam ao depauperamento das características físicas, químicas e biológicas, sendo a degradação das características físicas um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural do solo (Ferreira et al., 2010).

Uma das maneiras de avaliar a qualidade física do solo – não somente pela sua disponibilidade de água, aeração e temperatura – é pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes (Bottega et al., 2011). A resistência do solo à penetração (RSP) tem sido frequentemente utilizada como indicador da compactação do solo em sistemas de cultivo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e mostrar-se de fácil e rápida determinação (Mercante et al., 2003), sendo fortemente influenciado pelos seguintes atributos: teor de água, textura, densidade e composição mineralógica do solo. Para avaliar as relações entre a RSP e os demais atributos do solo, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos usando-se técnicas modernas, que avaliam mais detalhadamente estas relações. Uma destas técnicas é a geoestatística, que avalia a variabilidade espacial dos dados. A geoestatística permite estabelecer um modelo de semivariograma que melhor descreva a variabilidade espacial dos dados, o qual será utilizado no processo de interpolação digital pelo método da krigagem (Amaro Filho et al., 2007).

Com base no uso desta técnica, diversos estudos demonstraram que a variabilidade da RSP e o teor de água no solo não ocorrem ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial (Campos et al., 2012, 2013). Para diferentes condições de teores de água no solo, distintas variabilidades espaciais da RSP foram observadas por Utset e Cid (2001).

Nesse sentido, considerando-se que o teor de água no solo exerce forte influência nos resultados da RSP, a distribuição de chuvas pode afetar o desempenho das culturas, uma vez que, nos períodos de elevada ou baixa disponibilidade hídrica, o solo pode se tornar um ambiente favorável ou, então, restringir-se à distribuição das raízes das plantas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, em época de regimes hídricos chuvoso e seco, a variabilidade espacial da RSP e a umidade em solo cultivado com cana-de-açúcar, além de determinar a densidade amostral mínima para caracterização

da variabilidade espacial destes atributos no município de Humaitá-AM.

2 Material e Métodos

A área de estudo localiza-se no município de Humaitá, sul do Estado do Amazonas, BR 319, Km 55, em coordenadas geográficas com latitude: 07° 30' 21" S e longitude: 63° 1' 14" W, e altitude de aproximadamente 69 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 e 27 °C, precipitação média anual de 2.500 mm, com período chuvoso iniciando-se no mês de outubro e prolongando-se até junho, e umidade relativa do ar entre 85 e 90%.

O experimento foi instalado em um Cambissolo Háplico Alíticoplúntico, A moderado, textura média (Embrapa, 2013), sendo cultivado com cana-de-açúcar há aproximadamente oito anos, realizando-se a colheita manual em cana queimada. O solo foi gradeado, corrigido e adubado apenas uma vez ao se implantar a cultura. Foi realizado o mapeamento da área, estabelecendo uma malha de 70 x 70 m. As amostras de solo foram coletadas nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 m, perfazendo um total de 64 pontos (Figura 1).

Os pontos foram georreferenciados com um receptor de GPS Garmin Etrex com acurácia de 2,00 m (South American'69). Nesses pontos, foram coletadas amostras deformadas de solo com auxílio de trado holandês, para a determinação da umidade gravimétrica na profundidade 0,0-0,45 m, sendo realizada uma única avaliação por ponto das leituras da RSP nas profundidades de 0,0-0,15; 0,15-0,30 e 0,30-0,45 m. Essas coletas foram feitas em duas épocas: uma em período de elevada precipitação pluviométrica, que ocorreu no mês de janeiro de 2011, e a segunda no período de baixa precipitação pluviométrica, ocorrida no mês de agosto de 2011.

A umidade gravimétrica no solo foi determinada com amostras deformadas, conforme proposto em Embrapa (1997). Para a determinação da RSP a campo, foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de cone de 30° e área do cone de 1,29 cm², seguindo-se as normas da ASAES 313 (ASABE, 2006). A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida segundo Stolf (1991), aplicando a Equação 1:

$$RSP = \frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M + m} * \frac{Mg * h}{x} \right)}{A} \quad (1)$$

Em que:

- RSP = resistência do solo à penetração, kgf cm⁻² (kgf cm⁻² × 0,098 = MPa);
- M = massa do êmbolo, 4 kg (Mg – 4 kgf);
- m = massa do aparelho sem êmbolo, 3,2 kg (mg – 3,2 kgf);
- h = altura de queda do êmbolo, 40 cm;
- x = penetração da haste do aparelho, cm/impacto;
- A = área do cone, 1,29 cm².

A variabilidade da RSP e a umidade do solo foram analisadas pela análise exploratória dos dados, calculando-se média,

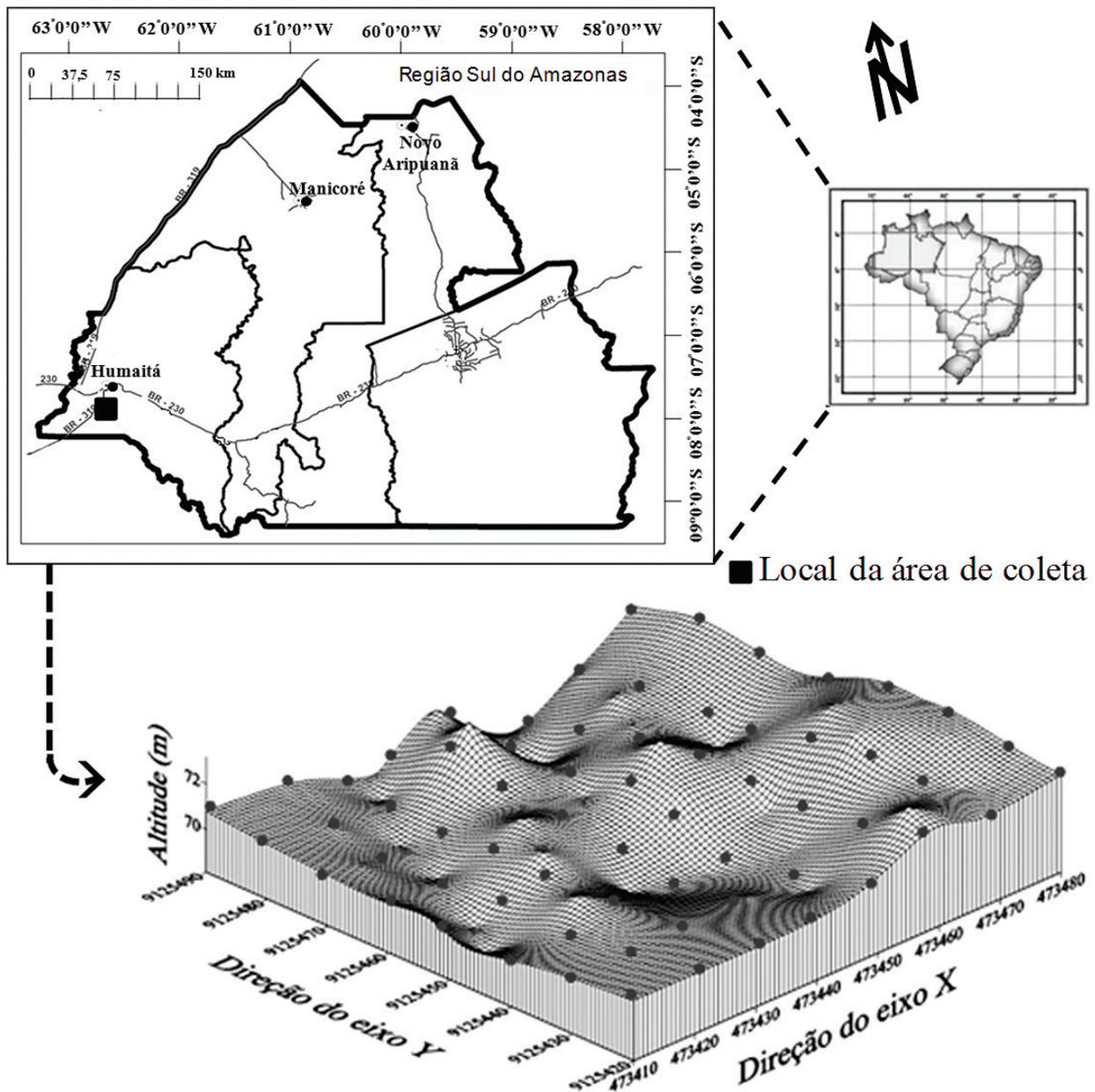


Figura 1. Localização e modelo de elevação digital da área com cultivo de cana-de-açúcar.

mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. O coeficiente de variação (CV%) foi analisado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo (<12%), médio (de 12 a 24%) e alto (>24%). A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov no programa computacional estatístico Minitab 14 (MINITAB, 2000).

Para determinação da existência da dependência espacial, foram modelados semivariogramas, utilizando análise geoestatística (Isaaks; Srivastava, 1989), por meio do programa computacional GS+ (Robertson, 2008). Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação 2:

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

Em que:

- $\hat{\gamma}(h)$ = valor da semivariância para o vetor h ;
- $N(h)$ = número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;
- $Z(x_i)$ = valor do atributo Z na posição x_i ;
- $Z(x_i+h)$ = valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

A escolha dos melhores modelos teóricos de semivariância foi realizada com base nos parâmetros da validação cruzada, sendo estes: coeficiente de regressão (CR); intercepto (y int.); erro padrão (SE), e coeficiente de determinação (R^2). Baseado

nos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais de cada atributo físico do solo, foi ajustado o semivariograma escalonado. Os semivariogramas experimentais foram escalonados pela divisão das semivariâncias pela variância estatística (Guimarães, 1993). De acordo com Guimarães (1993), verifica-se proporcionalidade quando os semivariogramas escalonados permitem o ajuste de um único modelo para as variáveis em estudo.

Os semivariogramas foram escalonados com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados da RSP e da umidade nas duas épocas estudadas. Além disso, o objetivo foi representar vários semivariogramas simultaneamente para compreender melhor os padrões de similaridade e as causas da variabilidade espacial (Ceddia et al., 2009). A escolha do modelo de semivariograma escalonado que melhor se ajustou aos dados foi realizada com base na menor soma de quadrados do resíduo.

Na análise do grau de aleatoriedade espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), segundo a qual valores de $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$ menores que 25% são considerados dependência espacial forte; valores de $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$ entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada, e valores de $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$ maiores que 75% são considerados dependência espacial fraca. Por meio do alcance dos semivariogramas de todos os atributos, foi determinado o número mínimo de amostras para que ainda seja possível promover a caracterização da variabilidade espacial de cada atributo estudado individualmente.

Posteriormente, os semivariogramas escalonados serviram como base de informação para calcular o número mínimo de amostragem do solo, para determinar a variabilidade da RSP e da umidade nas duas épocas estudadas (Equação 3).

$$N = \frac{A}{(a^2)/10000} \quad (3)$$

Em que:

- N = número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem;

- A = área total em hectares;
- a = alcance do semivariograma em metros.

Com base no coeficiente de variação, determinou-se o número de subamostras necessárias para compor uma amostra composta e estimar o valor médio das variáveis usando a fórmula descrita por Cline (1944), (Equação 4):

$$n = \left(\frac{t\alpha \cdot cv}{D} \right)^2 \quad (4)$$

Em que:

- n = número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem;
- $t\alpha$ = valor de t de Student (a probabilidade de 95%);
- CV = coeficiente de variação;
- D = percentagem de variância a partir do valor médio (5%).

3 Resultados e Discussão

Quase todas as profundidades nos dois atributos estudados apresentaram valores de assimetria próximos a zero, verificando simetria dos dados, o que indica que as técnicas geoestatísticas podem ser aplicadas a estes atributos (Tabela 1). Observa-se que os valores de média e mediana para a época chuvosa estão similares, evidenciando que as mesmas aproximam-se de uma distribuição normal. Isso pode ser um indicativo de que os dados seguem distribuições simétricas, sendo estes justificados pelos valores de assimetria e curtose próximos de zero. Exceção faz-se para RSP nas profundidades 0,0-0,15 e 0,30-0,45 m, que apresentaram valores de assimetria um pouco afastados de zero. Estes valores estão de acordo com Campos et al. (2012), que estudaram a variabilidade da RSP e da umidade do solo sob cultivo de mandioca na região de Humaitá-AM, em um Cambissolo Háptico textura média.

Observou-se que, na época chuvosa, houve aumento dos valores de RSP em profundidade e, na época seca, ocorreu aumento na profundidade 0,0-0,15 a 0,15-0,30 m, com

Tabela 1. Estatística descritiva para a umidade e a resistência do solo à penetração em cultivo com cana-de-açúcar.

Estatística	Época Chuvosa			Época Seca				
	Resistência do solo à penetração			Umidade	Resistência do solo à penetração			Umidade
	MPa			kg kg ⁻¹	MPa			kg kg ⁻¹
	Profundidade (m)				Profundidade (m)			
	0,0-0,15	0,15-0,30	0,30-0,45	0,0-0,45	0,00-0,15	0,15-0,30	0,30-0,45	0,0-0,45
Média	1,17	1,48	1,61	0,33	2,16	2,86	2,72	0,24
Mediana	1,11	1,46	1,59	0,32	1,90	2,37	2,43	0,24
Mínimo	0,65	0,65	0,65	0,25	0,78	1,07	1,05	0,21
Máximo	2,00	2,58	2,73	0,39	5,51	6,46	5,96	0,32
Assimetria	0,69	0,21	0,15	-0,03	1,47	1,09	1,08	0,90
Curtose	-0,03	0,10	0,17	0,74	2,58	0,73	1,25	2,46
DP	0,30	0,40	0,46	2,71	0,91	1,21	0,94	1,96
Variância	0,09	0,16	0,21	7,34	0,83	1,47	0,88	3,84
CV (%)	26,10	27,00	28,56	8,23	42,29	42,40	34,45	7,99
d	0,14*	0,06 ^{NS}	0,10 ^{NS}	0,90 ^{NS}	0,12*	0,16*	0,13*	0,90*

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; d: *significativo a 5% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. ^{NS}: não significativo.

diminuição na profundidade 0,30-0,45 m. Os valores de RSP na época chuvosa estão entre 1,17 e 1,61 MPa, com umidade de 0,33 kg kg⁻¹, e os valores observados de RSP na época seca estão entre 2,16 a 2,86 MPa, com umidade de 0,25 kg kg⁻¹ (Tabela 1).

Com os resultados da RSP, pode-se observar a influência da umidade em relação a este atributo, pois, na época chuvosa, os valores de umidade no solo foram mais elevados, resultando em valores de RSP menores, comparados aos da época seca. Resultados similares foram encontrados por Souza et al. (2006) avaliando a variabilidade espacial da RSP e o teor de água no solo, em duas épocas, em um Latossolo Vermelho textura argilosa no Município de Jaboticabal-SP.

Dexter (1987) afirma que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco e, em condições de maior umidade no solo, pode haver crescimento radicular mesmo em valores de RSP superiores a 4,0 MPa. Já Hamza e Anderson (2005) citam que valores de RSP entre 2 MPa e 3 MPa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular de várias culturas.

Levando-se em consideração as características das variáveis em estudo, Silveira et al. (2010) destacam que os valores atípicos de RSP não poderiam ser desprezados, pois estes representam a realidade encontrada no campo, em que a compactação pode se mostrar de forma pontual e com considerável variabilidade ao longo da área e das camadas avaliadas. Desta maneira, Coelho et al. (2012) destacaram que, com a utilização da geoestatística, esses valores discrepantes devem ser confrontados com os valores vizinhos, a fim de se verificar a necessidade de excluí-los.

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov na época chuvosa mostraram que somente a RSP na camada 0,0-0,15 m indicou normalidade; já na época seca, tanto a RSP quanto a umidade obtiveram normalidade, concordando com valores observados por Coelho et al. (2012). Apesar de a normalidade dos dados não ser uma exigência da geoestatística,

é importante que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem.

Os atributos apresentaram CV variando de baixo, médio e alto (Tabela 1), segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980). Dentre as épocas estudadas, a época seca apresentou maiores valores de CV, principalmente para a RSP nas três profundidades. Isso pode ser um indicativo da alta variabilidade deste atributo, principalmente quando determinado em época seca, o que pode influenciar nos métodos ou quantidades de amostragens para determinação deste atributo.

Em relação ao CV, pode-se comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não se permite analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo, nem seu padrão espacial (Warrick; Nielsen, 1980). Para isso, foi utilizado a análise geoestatística, pela qual se observou que as duas épocas estudadas apresentaram variabilidade no espaço para os dois atributos, sendo este resultado expresso pelo ajuste dos semivariogramas (Tabela 2). Nota-se que o modelo exponencial e esférico predominou no ajuste aos atributos físicos do solo das épocas seca e chuvosa, respectivamente. De acordo com Grego e Vieira (2005), os modelos esféricos e exponenciais são os que mais se ajustam aos dados dos atributos do solo.

Para o ajuste do semivariograma escalonado, verificou-se resultado semelhante com o ajuste dos semivariogramas dos atributos avaliados individualmente (Figura 2). Na época chuvosa, os atributos ajustaram-se ao modelo esférico (Figura 2b), apresentando dependência espacial diferente em relação à época seca, que se ajustou ao modelo exponencial (Figura 2a).

Os ajustes dos modelos aos atributos do solo explicam seus resultados, uma vez que, segundo Isaaks e Srivastava (1989), os modelos exponenciais são mais bem ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da umidade e da resistência do solo à penetração, cultivado com cana-de-açúcar.

Estatística	Resistência do solo à penetração			Umidade
	Época Seca			
	Profundidades (m)			
	0,0-0,15 m	0,15-0,30 m	0,30-0,45 m	0,0-0,45 m
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
Efeito pepita (C_0)	0,03	0,07	0,01	6,29E-004
Patamar (C_0+C_1)	0,05	0,15	0,02	4,08E-003
Alcance (a)	52,79	50,00	45,19	23,40
¹ GDE	47,00	50,30	70,20	84,60
² R ²	0,89	0,98	0,99	0,97
	Época Chuvosa			
Modelo	Esf.	Esf.	EPP	Esf.
Efeito pepita (C_0)	0,03	0,45	-	2,99
Patamar (C_0+C_1)	0,05	0,12	-	5,91
Alcance (a)	52,23	52,65	-	59,58
¹ GDE	30,70	61,60	-	49,94
² R ²	0,94	0,90	-	0,96

¹GDE: grau de dependência espacial; ²R²: coeficiente de determinação; Esf.: esférico; Exp.: Exponencial.

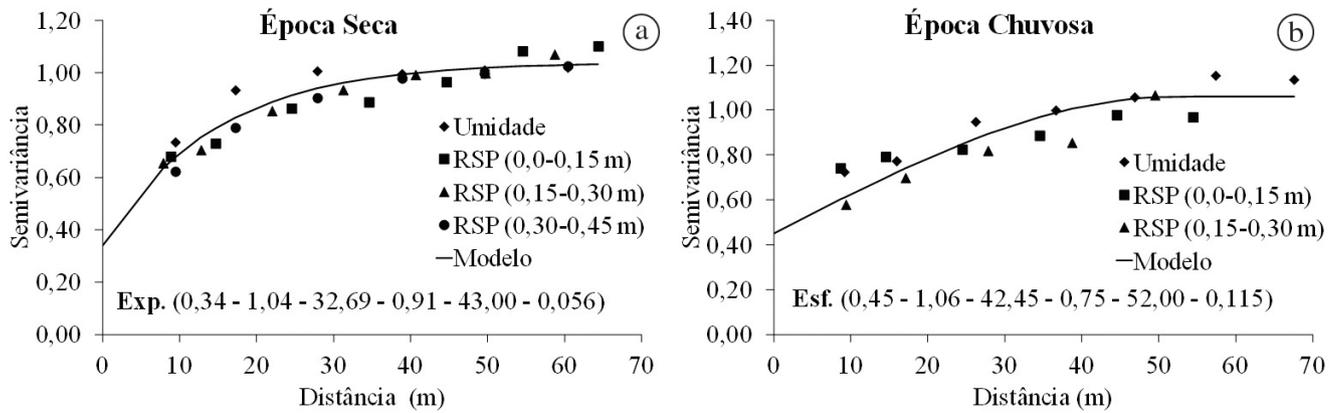


Figura 2. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados na umidade e resistência do solo à penetração (RSP). Esf. = Esférico; Exp. = Exponencial; [modelo (efeito pepita - patamar - GDE - R2 - alcance - resíduo)]. GDE = grau de dependência espacial; R2 = coeficiente de determinação; a = época seca; b = época chuvosa.

descrevem propriedades com alta continuidade espacial ou menos erráticos na curta distância, ou seja, a transição entre valores é mais suave ou menos abrupta.

Para o Grau de Dependência Espacial (GDE) dos atributos individualmente (Tabela 2), somente a umidade do solo na época seca foi classificada como fraca, sendo as demais, classificadas como moderadas (Cambardella et al., 1994), corroborando com valores encontrados por Souza et al. (2006), em Latossolo de textura argilosa sob cultivo de cana-de-açúcar com mais de 40 anos. Já no ajuste dos semivariogramas escalonados, o GDE foi classificado como moderado para as duas épocas estudadas (Figuras 2). Para Cambardella et al. (1994), as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo (material de origem, relevo, clima, organismos e tempo), enquanto que a dependência espacial moderada, possivelmente, seria devido à homogeneização do solo, o que pode ser um indicativo de menor variabilidade dos dados.

Avaliando-se o alcance dos semivariogramas ajustados aos atributos, é possível observar que estes apresentaram variabilidade espacial menor do que a estabelecida na malha amostral (Tabela 2). A época seca apresentou valores de alcance menor em relação à época chuvosa, indicando maior variabilidade dos dados (Figura 2a). Comparando-se os valores de alcance para as duas épocas estudadas, observou-se uma relação entre a umidade e a RSP. Nota-se que os valores de alcance da RSP e da umidade são próximos, mostrando que estes apresentam variabilidade espacial semelhante, ou seja, a umidade no solo interfere diretamente nos valores de variabilidade da RSP. Estes valores de alcance fornecem informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas em cada época (Trangmar et al., 1985).

Os valores do alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas escalonados mostraram maior dependência espacial na época seca (43 m) (Figura 2a) em relação à época chuvosa (52 m) (Figura 2b). No entanto, RSP na profundidade 0,30-0,45 m, na época chuvosa, apresentou efeito pepita puro, o que, segundo Souza et al. (2006), provavelmente é devido

ao alto teor de água no solo, caso encontrado pelos mesmos autores. O efeito pepita puro é um parâmetro importante, pois este indica uma variabilidade não explicada, considerando-se a distância de amostragem utilizada (Mcbratney; Webster, 1983). Apesar da menor variabilidade na época chuvosa nas profundidades 0,0-0,15 e 0,15-0,30 m, esta apresentou maior variabilidade na profundidade 0,30-0,45 m, podendo ser influenciada pela taxa de infiltração irregular em profundidade.

Estes valores de RSP com alcances inferiores na época seca mostram que, possivelmente, existe uma maior heterogeneidade dos atributos do solo, o que pode causar uma maior variabilidade da RSP em época com menor umidade, uma vez que, segundo Vieira (2000), o alcance do semivariograma é uma medida importante, pois pode auxiliar na definição de práticas de amostragem. Ou seja: pontos coletados em uma área circular de raio igual ao alcance são correlacionados espacialmente e, acima deste, são independentes, podendo-se utilizar a estatística clássica para o estudo dos atributos do solo. Para Mcbratney e Webster (1983), o alcance é uma medida importante no planejamento e na avaliação experimental, já que pode auxiliar na definição de procedimento de amostragem.

Os dados presentes nas figuras da validação cruzada (Figuras 3 e 4) mostraram que, para a umidade do solo, existe pequena diferença entre os valores do coeficiente de determinação (Figuras 3a e 3b). O menor valor encontrado foi de 0,11 para umidade na época seca, e o maior valor, de 0,20, foi observado para umidade na época chuvosa. Segundo Paz-Gonzalez et al. (2001), os baixos valores do coeficiente de determinação podem estar relacionados com o fato de os dados não seguirem distribuição normal, o que, apesar de não ser um parâmetro obrigatório, proporciona melhores resultados de estimação.

O maior coeficiente de regressão foi observado para a validação cruzada da umidade na época chuvosa (0,93) (Figura 3b) e o menor, para umidade na época seca (0,75) (Figura 3a). Para Bottega et al. (2013), baixo coeficiente de regressão é decorrente da dispersão da nuvem de pontos em

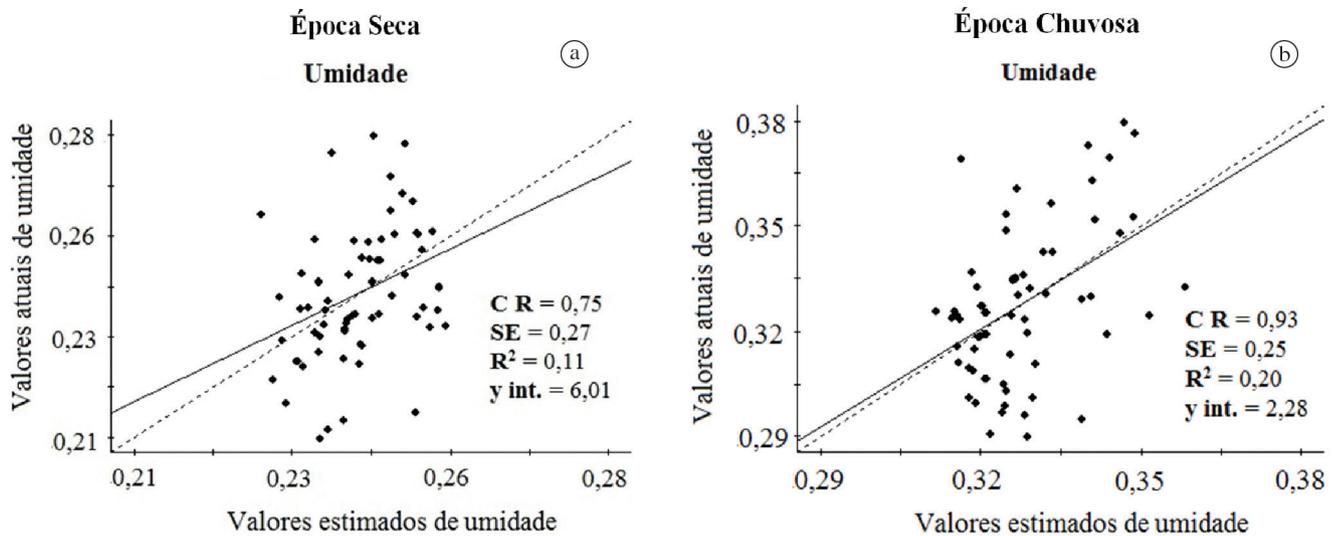


Figura 3. Parâmetros da validação cruzada dos modelos teóricos de semivariância ajustados para a umidade em área sob cultivo de cana-de-açúcar. a = umidade época seca; b = umidade época chuvosa; CR = coeficiente de regressão; SE = erro padrão; R^2 = coeficiente de determinação; y int. = intercepto em y.

torno da reta ideal, que possui coeficiente angular de valor 1 e corta a origem do eixo y (intercepto) no valor zero.

Os menores coeficientes de determinação para a estimativa da RSP em locais não amostrados foram observados para a RSP (0,0-0,15 m) na época chuvosa ($R^2= 0,15$) (Figura 4d) e a RSP (0,30-0,45 m) na época seca ($R^2= 0,16$) (Figura 4c). As mesmas variáveis apresentaram valores do coeficiente de regressão 0,96 e 0,84, respectivamente, corroborando com Coelho et al. (2012). A RSP, para as duas épocas estudadas, apresentou erro padrão próximo a zero, o que, associado aos demais parâmetros, mostra que o modelo ajustado tem boa precisão na estimativa de valores deste atributo em locais não amostrados.

Neste sentido, a RSP na profundidade 0,0-0,15 m, na época chuvosa (Figura 4d), apresentou um dos maiores valores de erro padrão, pois, embora dispersa a nuvem de pontos, os mesmos mantêm um padrão de dispersão uniforme, não sendo observada a presença de pontos discrepantes ao arranjo da nuvem. Assim como a RSP analisada, a umidade do solo apresentou valores de erro padrão próximos a zero, porém um pouco maior que os observados para a validação da RSP.

Com base nos valores de alcance estimados nos semivariogramas e no CV, pode-se estimar a densidade amostral para as variáveis estudadas (Tabela 3). Analisando-se os atributos individualmente, observa-se que a densidade amostral mínima variou de 3 para umidade e 4 pontos por hectare para a época chuvosa, e de 4 a 5 para RSP e 18 pontos por hectare para a época seca.

O alcance do semivariograma escalonado indica resultado semelhante ao alcance dos atributos individuais, mostrando maior variabilidade para a época seca, apresentando densidade amostral mínima de cinco pontos por hectare, enquanto, na época chuvosa, esse valor foi de quatro pontos por hectare. Este resultado mostra que, em períodos secos, ou de baixa pluviosidade, há maior variabilidade dos atributos físicos do

Tabela 3. Valores de densidade amostral da umidade e de resistência do solo à penetração (RSP) de acordo com o alcance dos semivariogramas e a fórmula de Cline (CV), em solo cultivado com cana-de-açúcar.

Atributos	Alcance do semivariograma	
	Época Chuvosa	Época Seca
	Densidade amostral (ponto ha ⁻¹)	
RSP (0,0-0,15 m)	4	4
RSP (0,15-0,30 m)	4	4
RSP(0,30-0,45 m)	-	5
Umidade (0,0-0,45 m)	3	18
Semivariograma Escalonado	4	5
	Cline	
RSP (0,0-0,15 m)	376	987
RSP (0,15-0,30 m)	402	992
RSP(0,30-0,45 m)	450	655
Umidade (0,0-0,45 m)	37	29
CV médio (%)	316	666

solo, em decorrência da infiltração pouco homogênea da água no perfil do solo.

A densidade amostral baseada no CV dos atributos físicos do solo apresentou resultado semelhante ao do parâmetro alcance, com maior densidade amostral para a época seca (Tabela 3). Este resultado é decorrente da alta variabilidade individual da RSP em todas as profundidades e nas duas épocas de estudo, o que influenciou diretamente na determinação média da densidade amostral usando o CV. Neste sentido, estes valores de densidade amostral servem como referência para trabalhos futuros desta natureza, em que se pode minimizar o trabalho de campo e, conseqüentemente, os custos.

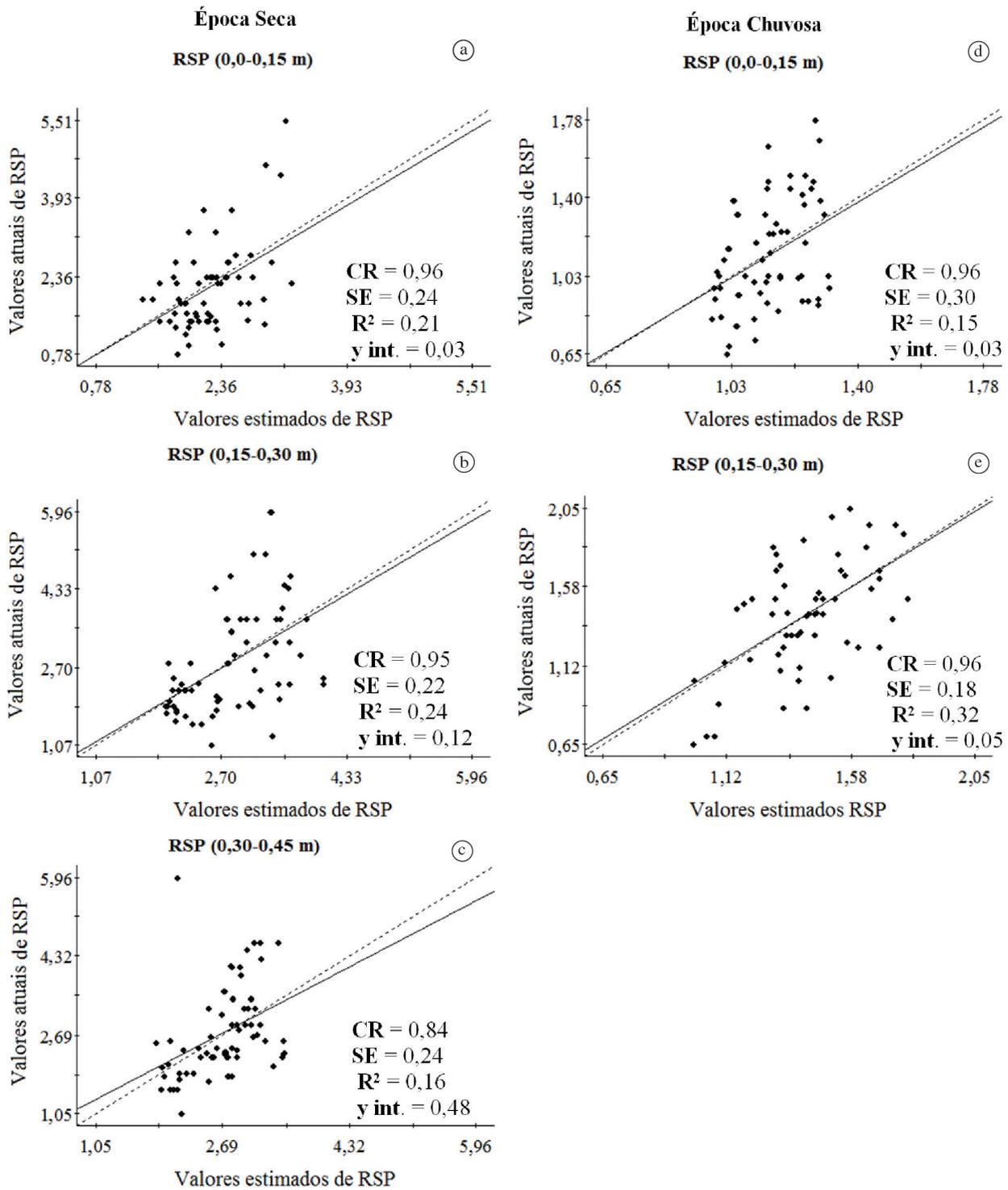


Figura 4. Validação cruzada dos modelos teóricos de semivariância ajustados para a RSP em área sob cultivo de cana-de-açúcar. CR = coeficiente de regressão; SE = erro padrão; R² = coeficiente de determinação; y int.= intercepto em y.

4 Conclusões

A época chuvosa apresenta maior valor de umidade e menor resistência do solo à penetração em cultivo com cana-de-açúcar, mostrando a relação entre estes atributos.

A época seca apresenta maior variabilidade da umidade e da resistência à penetração em cultivo com cana-de-açúcar, com maior densidade amostral baseada no alcance do semivariograma (4 e 5 pontos ha⁻¹, para época chuvosa e seca) e no coeficiente de variação (316 e 666 pontos ha⁻¹, para época chuvosa e seca).

Referências

- AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 3, p. 415-422, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300001>
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE. *ASAE standard S313.3*: Soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 2006.
- BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIRO, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v6i2a882>
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001>
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society of American Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. A.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 8, n. 2, p. 305-310, 2013. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2091>
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. A.; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *Revista Agro@mbiente*, v. 6, n. 1, p. 9-16, 2012.
- CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA, A. L. O.; MOTA, L. S.; ANJOS, L. H. C.; CARVALHO, D. F. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Scientia Agrícola*, v. 66, n. 3, p. 338-352, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000300009>
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. *Soil Science*, v. 58, n. 2, p. 275-288, 1944. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194410000-00003>
- COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 3, p. 755-763, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300007>
- DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. *Plant and Soil*, v. 98, n. 2, p. 303-312, 1987. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02378351>
- EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.
- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.
- FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n4p913>
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; DESUÓ, I. C. Atributos físicos e químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar próximo a fragmento nativo. *HOLOS Environment*, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2011.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000200002>
- GUIMARÃES, E. C. *Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo*. 1993. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade de Campinas, Campinas, 1993.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- MARÇAL, C. T. *Efeitos da cultura da cana-de-açúcar e seu manejo (uso de vinhaça e método de colheita) sobre a mesofauna do solo*. 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Science*, v. 135, n. 3, p. 177-183, 1983. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-198303000-00007>
- MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000600019>
- MINITAB. *MINITAB Release 14.1. Statistical Software*. Canadá, 2000
- PAZ-GONZALEZ, A.; TABOADA CASTRO, M. T.; VIEIRA, S. R. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 81, n. 4, p. 469-479, 2001. <http://dx.doi.org/10.4141/S00-095>
- ROBERTSON, G. P. *GS+*: Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 2008.
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>
- 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*, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000100019>

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, v. 38, n. 1, p. 54-94, 1985.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil & Tillage*

Research, v. 61, n. 3-4, p. 193-202, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00204-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00204-5)

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). *Tópicos ciência do solo*. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

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

Contribuição dos autores: Ivanildo Amorim de Oliveira realizou as coletas de solo do experimento, a revisão bibliográfica e a escrita científica; Milton César Costa Campos contribuiu com a coleta de solo do experimento, a revisão bibliográfica, a escrita científica, as correções técnica e gramatical do trabalho; Renato Eleotério de Aquino contribuiu com as coletas de solo do experimento e a escrita científica; José Marques Júnior contribuiu com a escrita e as correções técnica e gramatical do trabalho; Ludmila de Freitas contribuiu com revisão bibliográfica, a escrita científica e as traduções do *abstract* do trabalho; Zigomar Menezes de Souza contribuiu com a revisão bibliográfica e a escrita científica.

Agradecimentos: Os autores agradecem à FAPEAM e ao CNPq, pelo financiamento e pelo apoio à pesquisa.

Fonte de financiamento: O presente trabalho – ‘**Semivariograma escalonado no planejamento amostral da resistência à penetração e umidade de solo com cana-de-açúcar**’ – recebeu apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, e apoio da pesquisa pelo Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente - IEAA da Universidade Federal do Amazonas - UFAM.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse do trabalho ‘**Semivariograma escalonado no planejamento amostral da resistência à penetração e umidade de solo com cana-de-açúcar**’.