

Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta¹

Renato Eleoterio de Aquino², José Marques Júnior²,
Milton Cesar Costa Campos³, Ivanildo Amorim de Oliveira², Diego Silva Siqueira²

ABSTRACT

Spatial distribution of soil chemical properties in pasture and forest area

The knowledge on spatial distribution of soil properties by means of geostatistics is important as an indicator for a better soil use and management. This study aimed at evaluating the spatial distribution of soil chemical properties, in a forest and pasture area in Manicoré, Amazonas State, Brazil. Grids with 70.00 m x 70.00 m, with regular spacing of 10.00 m x 10.00 m, totaling 64 points, were established, and then soil samples were collected at the depths of 0.0-0.20 m and 0.40-0.60 m and had their chemical properties determined. Data were analyzed by using descriptive statistics and geostatistics, and the sampling density analysis was based on the coefficient of variation and semivariograms range. The mean and median values were adjusted to the closest values, indicating normal distribution, while the spherical, exponential and gaussian models were adjusted to the soil chemical properties. It was concluded that the geostatistics provided adequate information for understanding the spatial distribution. The forest area showed a higher spatial continuity and the pasture area a lower sampling density. The chemical properties showed differences in the spatial variability, while the range represented better the estimates for sampling density and spacing, in the forest and pasture area.

KEY-WORDS: Spatial variability; geostatistics; sampling density.

RESUMO

O conhecimento da distribuição espacial de atributos do solo, por meio da geoestatística, é importante como indicador para um melhor uso e manejo do solo. Este estudo objetivou avaliar a distribuição espacial de atributos químicos do solo, em área de pastagem e floresta, na região de Manicoré (AM). Foram estabelecidas malhas de 70,00 m x 70,00 m, com espaçamento regular de 10,00 m x 10,00 m, totalizando 64 pontos, e, em seguida, coletadas amostras de solo, às profundidades de 0,0-0,20 m e 0,40-0,60 m, sendo determinados os seus atributos químicos. Os dados foram analisados utilizando-se técnicas de estatística descritiva e geoestatística, e a densidade amostral determinada com base no coeficiente de variação e no alcance dos semivariogramas. Os valores da média e mediana se ajustaram aos valores próximos, indicando distribuição normal, enquanto os modelos esférico, exponencial e gaussiano se ajustaram aos atributos químicos do solo. Concluiu-se que a geoestatística forneceu informações adequadas para a compreensão da distribuição espacial. A área com floresta apresentou maior continuidade espacial e a área com pastagem menor densidade amostral. Os atributos químicos evidenciaram diferenças na variabilidade espacial, enquanto o alcance representou melhor as estimativas para a densidade amostral e espaçamento, na área de floresta e pastagem.

PALAVRAS-CHAVE: Variabilidade espacial; geoestatística; densidade amostral.

INTRODUÇÃO

As alterações na composição da vegetação de ecossistemas naturais associadas a práticas de manejo, que são atribuídas a fatores como exploração agrícola, pecuária e, principalmente, florestal (Alencar et al. 2004), trazem consequências não só em relação à biodiversidade, mas, também, quando se analisa a deterioração causada aos solos e a sua possibilidade de reutilização e/ou conservação (Chaves et al. 2012).

Estudos que visam a analisar os efeitos causados pela ação antrópica sobre propriedades do solo constituem valiosos recursos para avaliações e/ou previsões sobre os danos causados ao ambiente, servindo como subsídios à discussão sobre a manutenção de ecossistemas ou a sua ocupação racional, com previsões sobre a extensão dos efeitos desta ocupação (Longo 1999).

No tocante à geoestatística, o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo surge como

1. Trabalho recebido em mar./2013 e aceito para publicação em jan./2014 (nº registro: PAT 23406).

2. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, Brasil.
E-mails: aquino.rea@gmail.com, marques@fcav.unesp.br, ivanildoufam@gmail.com, diego_silvasiqueira@yahoo.com.br.

3. Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Humaitá, AM, Brasil.
E-mail: mcesarsolos@gmail.com.

uma alternativa para esses fins, pois permite quantificar a magnitude e o grau de dependência espacial e descrever, detalhadamente, a variabilidade espacial das variáveis estudadas, por meio de um interpolador exato e preciso (Uchôa et al. 2011, Santi et al. 2012). Assim, permite a interpretação e a projeção dos resultados, com base na estrutura da sua variabilidade natural, podendo indicar alternativas de uso, além de possibilitar melhor compreensão da variabilidade dos atributos, sua influência sobre a produção (Silva Neto et al. 2012) e a indicação de uma densidade de amostragem ideal, por meio do uso de técnicas de avaliação da variabilidade espacial de atributos do solo (Vieira 2000).

Uma das grandes dificuldades encontradas nos estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo tem sido a determinação do espaçamento ideal de amostragem, o que, em algumas situações, inviabiliza a adoção das técnicas de agricultura de precisão (Montanari et al. 2005, Souza et al. 2006).

O estudo dos aspectos da amostragem do solo, a fim de subsidiar definições sobre a utilização e recomendação destas técnicas em ambientes distintos, tem sido preocupação constante de pesquisadores (Lark 2000, Rios et al. 2008, Coelho et al. 2009, Rodrigues et al. 2012, Spezia et al. 2012). Trabalhos como os de Montanari et al. (2005) e Souza et al. (2006), desenvolvidos em latossolos, considerando-se o aspecto solo-relevo, mostraram que a utilização da densidade amostral é uma ferramenta eficiente para a estimativa dos atributos químicos do solo, diminuindo o número de amostras a serem coletadas.

Os atributos químicos do solo, com exceção do pH, apresentam maior variação que os atributos físicos, em uma área cultivada (Botega et al. 2013). Sendo assim, o uso de uma amostragem aleatória, que utiliza a média para caracterizar determinado atributo do solo, seria insuficiente para caracterizar toda uma classe de solo. Entretanto, vários estudos mostraram que os atributos químicos do solo apresentam intensa dependência espacial, verificada por meio da análise geoestatística (Corá et al. 2004, Bekele & Hudnall 2006, Motomiya et al. 2006, Souza et al. 2006, Campos et al. 2007, Cavalcante et al. 2007, Zanão Júnior et al. 2007 e 2010, Marques Júnior et al. 2008, Lima et al. 2013a e 2013b).

Diante do pressuposto, este trabalho objetivou estudar a distribuição espacial de atributos químicos do solo, em área de pastagem e floresta, na região de Manicoré (AM).

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área experimental localizada ao sul do Estado do Amazonas, nas imediações da comunidade de Santo Antônio de Matupí, região de Manicoré (AM), no segundo semestre de 2011. A área de pastagem está situada nas coordenadas 07°54'42"S e 61°31'50"W (altitude média de 135 m). Paralela à área de pastagem, encontra-se a área de floresta (07°54'44,5"S, 61°31'44,7"W e altitude média de 140 m) (Figura 1).

O material de origem é proveniente da alteração de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior, sedimentos coluviais, depositados nas partes mais baixas da paisagem, e coberturas terciárias (Brasil 1978). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso, com um período seco de pequena duração (Am) e temperaturas variando entre 25°C e 27°C, com precipitações pluviais entre 2.250 mm e 2.750 mm e chuvas concentradas de outubro a junho (Brasil 1978).

Nessas áreas, foram estabelecidas malhas de 70 m x 70 m, e o solo foi amostrado nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 m em 10 m, perfazendo total de 64 pontos amostrais em cada malha (Figura 1). Estes pontos foram georreferenciados com equipamento de GPS Garmin Etrex (South American 69), com precisão < 15 m, 95% típico. Em seguida, foi realizada a coleta de amostras de solo, às profundidades de 0,0-0,20 m e 0,40-0,60 m, para determinação dos atributos químicos. Os valores da caracterização granulométrica das áreas amostradas encontram-se na Tabela 1.

Foram realizadas as seguintes análises químicas: cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, extraídos por KCl; potássio e fósforo disponível, extraídos por Mehlich-1; e acidez potencial (H+Al), extraída com solução tamponada (pH 7,0) de acetato de cálcio (Em-

Tabela 1. Análises granulométricas (g kg⁻¹) para pastagem e floresta (Manicoré, AM, 2011).

Análise granulométrica					
Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia
Profundidade 0,0-0,20 m		Profundidade 0,40-0,60 m			
<i>Área com pastagem</i>					
361,63	227,60	410,78	475,40	210,16	321,36
<i>Área com floresta</i>					
327,94	313,24	358,81	392,94	355,71	251,35

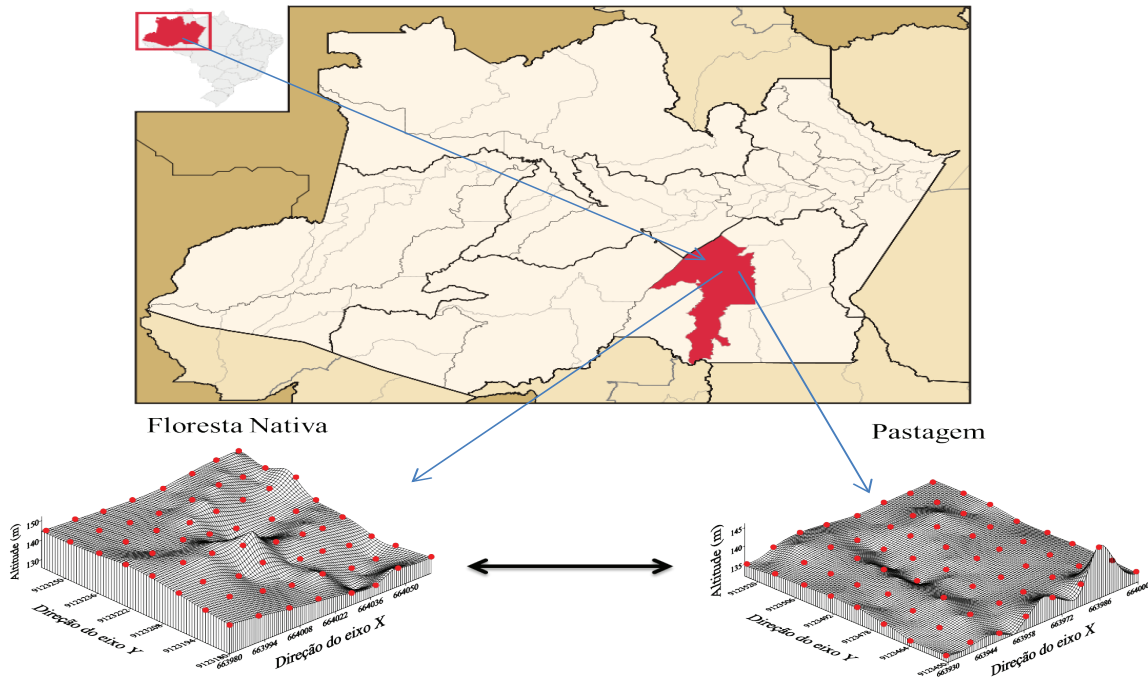


Figura 1. Modelo de Elevação Digital das áreas de floresta e pastagem (Manicoré, AM, 2011).

brapa 1997). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas as somas de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%).

O pH foi determinado potenciométricamente, utilizando-se a relação 1:2,5 de solo: em água. O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black, modificado por Yeomans & Bremner (1988). A matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

Após obtenção dos dados, a avaliação dos atributos químicos da pastagem e floresta foi efetuada, primeiramente, pela análise exploratória dos dados, calculando-se a média, mediana, variância, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e teste de normalidade. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, pelo *software* estatístico Minitab 14.1 (Minitab 2000).

Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística (Isaaks & Srivastava 1989). Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela seguinte equação:

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

em que $\hat{\gamma}(h)$ = valor da semivariância, para uma distância 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 .

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: efeito pepita (C_0) - valor da semivariância para a distância zero, que representa o componente da variação ao acaso; variância estrutural (C_1); patamar ($C_0 + C_1$) - valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; e alcance (a) - distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (Vieira et al. 1983, Trangmar et al. 1985).

Na determinação da existência ou não de dependência espacial, utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS+ (Robertson 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo, para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor R^2 (coeficiente de determinação).

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Tabela 2), utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), segundo a qual valores de $[C_0/(C_0 + C_1)]$ menores que 25% indicam

dependência espacial forte, valores entre 25% e 75% indicam dependência espacial moderada e valores maiores que 75% indicam dependência espacial fraca.

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, utilizando-se a fórmula descrita por Cline (1944):

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} \cdot CV}{D} \right)^2$$

Também foi determinado o número de subamostras, com base nos valores de alcance obtidos na análise de geoestatística.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da média e mediana encontravam-se próximos, indicando que estas variáveis apresentam distribuição normal. Contudo, também foram observadas algumas variáveis com valores distantes da média e mediana, apresentando, neste caso, distribuição anormal ou assimétrica (Tabelas 2 e 3).

A assimetria e a curtose servem como indicadores de distribuição dos valores analisados, se eles apresentam valores simétricos ou não, onde o ideal é que estes valores estejam próximos do valor central zero (Cortez et al. 2011). Verificou-se que ocorreram muitas variáveis com valores distantes de zero, em ambas as profundidades e áreas, ocorrendo com mais frequência à profundidade de 0,40-0,60 m e na área de floresta, indicando, desta maneira, que as variáveis, na sua maioria, apresentaram distribuição assimétrica (Tabelas 2 e 3). Grego et al. (2012) encontrou valores de assimetria e curtose relativamente altos, em área de pastagem, indicando assimetria elevada.

Ainda analisando os valores de média de ambas as áreas e suas respectivas profundidades, observou-se que a área de pastagem apresentava maiores valores dos atributos químicos, quando comparada à área de floresta, com exceção de P, permitindo afirmar que o uso do solo com pastagem não trouxe nenhum prejuízo aos atributos químicos do solo (Tabelas 2 e 3).

Nesse sentido, Dias-Filho (1998) observou que, em áreas com pastagem, o pH, a soma de bases, a CTC efetiva e a V% da camada superficial do solo

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos químicos, em área de pastagem (Manicoré, AM, 2011).

Atributo	Estatística descritiva										
	Un.	Média	Med.	Mín.	Máx.	DP	Var.	CV%	Curtose	Assim.	d
<i>Profundidade 0,00-0,20 m</i>											
pH	H ₂ O	4,30	4,25	3,90	5,30	0,26	0,06	6,09	2,59	1,38	0,19*
H+Al	mmol kg ⁻¹	61,13	64,00	28,00	88,00	13,59	184,65	22,23	-0,37	-0,48	0,16*
MO	g dm ⁻³	27,46	27,00	18,00	39,00	3,73	13,93	13,59	0,99	0,43	0,12*
P	mg dm ⁻³	4,60	4,00	2,00	10,00	1,16	1,35	25,23	7,16	1,82	0,23*
K	mmol kg ⁻¹	1,71	1,30	0,60	6,10	1,15	1,32	67,30	2,78	1,58	0,18*
Ca	mmol kg ⁻¹	10,26	8,00	4,00	34,00	6,57	43,24	64,06	2,75	1,69	0,19*
Mg	mmol kg ⁻¹	4,64	4,00	2,00	10,00	1,80	3,25	38,85	0,08	0,78	0,20*
SB	mmol kg ⁻¹	16,62	13,45	6,90	45,70	8,54	72,91	51,38	1,69	1,39	0,17*
CTC	mmol kg ⁻¹	77,74	77,80	58,10	94,90	8,08	65,35	10,40	0,11	-0,34	0,07 ^{ns}
V	%	21,99	17,36	7,27	62,01	2,28	150,73	55,84	1,37	1,32	0,18*
<i>Profundidade 0,40-0,60 m</i>											
pH	H ₂ O	4,28	4,30	3,80	4,90	0,19	0,03	4,59	3,49	1,14	0,25*
H+Al	mmol kg ⁻¹	51,52	52,00	28,00	88,00	10,30	106,00	19,99	3,08	1,15	0,26*
MO	g dm ⁻³	15,92	15,00	10,00	29,00	4,11	16,93	25,84	2,50	1,46	0,19*
P	mg dm ⁻³	2,62	3,00	1,00	6,00	1,16	1,34	44,25	0,89	0,78	0,20*
K	mmol kg ⁻¹	0,69	0,50	0,30	2,90	0,54	0,30	79,20	6,99	2,54	0,23*
Ca	mmol kg ⁻¹	4,68	4,00	2,00	18,00	3,20	10,28	68,41	6,13	2,43	0,30*
Mg	mmol kg ⁻¹	2,34	2,00	1,00	6,00	1,23	1,53	52,79	2,12	1,44	0,29*
SB	mmol kg ⁻¹	7,72	6,40	3,30	26,30	4,64	21,55	60,10	5,09	2,19	0,22*
CTC	mmol kg ⁻¹	59,24	56,30	44,30	98,30	10,28	105,74	17,36	5,49	2,18	0,22*
V	%	13,13	11,11	5,96	43,61	7,98	63,70	60,76	6,60	2,48	0,22*

Un. = unidade; DP = desvio padrão; Var. = variância; Med. = mediana; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; CV = coeficiente de variação; Assim. = coeficiente de assimetria; d = teste de normalidade; * significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5%; ^{ns} não significativo.

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos químicos, em área de floresta (Manicoré, AM, 2011).

Atributo	Estatística descritiva										
	Un.	Média	Med.	Mín.	Máx.	DP	Var.	CV%	Curtose	Assim.	d
<i>Profundidade 0,00-0,20 m</i>											
pH	H ₂ O	3,97	3,90	3,70	4,60	0,19	0,03	4,79	0,25	0,74	0,11*
H+Al	mmol kg ⁻¹	74,92	88,00	34,00	109,00	22,04	485,85	29,42	-1,54	-0,21	0,15*
MO	g dm ⁻³	18,66	20,50	6,00	31,00	6,58	43,34	35,29	-1,21	-0,28	0,13*
P	mg dm ⁻³	6,09	5,50	2,00	10,00	2,20	4,848	36,13	-0,84	0,49	0,08 ^{ns}
K	mmol kg ⁻¹	1,66	1,50	0,30	7,80	1,12	1,248	67,25	14,13	2,97	0,14*
Ca	mmol kg ⁻¹	4,77	3,00	2,00	34,00	4,86	23,61	101,96	23,35	4,50	0,28*
Mg	mmol kg ⁻¹	2,52	2,00	1,00	6,00	1,27	1,61	50,58	2,53	1,80	0,15*
SB	mmol kg ⁻¹	8,94	7,05	3,30	41,20	6,18	38,15	69,08	13,08	3,27	0,27*
CTC	mmol kg ⁻¹	83,86	93,95	39,50	115,80	21,94	481,15	26,16	-1,37	-0,37	0,19*
V	%	11,11	8,40	5,40	49,50	7,59	57,66	68,34	11,17	2,99	0,26*
<i>Profundidade 0,40-0,60 m</i>											
pH	H ₂ O	4,11	4,10	3,80	4,50	0,13	0,017	3,18	0,31	-0,16	0,06 ^{ns}
H+Al	mmol kg ⁻¹	59,55	52,00	42,00	88,00	14,43	208,09	24,23	-0,53	0,87	0,13*
MO	g dm ⁻³	14,05	11,50	7,00	27,00	5,44	29,60	38,73	-0,54	0,90	0,20*
P	mg dm ⁻³	6,50	6,00	5,00	12,00	1,78	3,17	27,41	0,23	1,06	0,14*
K	mmol kg ⁻¹	1,39	1,20	0,40	4,40	0,78	0,61	56,24	3,44	1,61	0,10*
Ca	mmol kg ⁻¹	3,44	3,00	2,00	13,00	1,88	3,52	54,58	10,41	2,76	0,16*
Mg	mmol kg ⁻¹	1,98	2,00	1,00	8,00	1,18	1,38	59,21	10,44	2,64	0,09 ^{ns}
SB	mmol kg ⁻¹	6,81	5,90	3,40	25,40	3,57	12,75	52,41	11,24	2,79	0,17*
CTC	mmol kg ⁻¹	66,36	60,50	46,50	100,40	15,30	234,14	23,06	-0,61	0,86	0,18*
V	%	10,34	9,00	5,50	37,70	4,97	24,73	48,11	14,01	3,11	0,20*

Un. = unidade; DP = desvio padrão; Var. = variância; Med. = mediana; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; CV = coeficiente de variação; Assim. = coeficiente de assimetria; d = teste de normalidade; * significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5%; ^{ns} não significativo.

permaneceram elevados, sugerindo que, evitando-se a erosão por meio do manejo adequado da pastagem, as perdas de cátions podem ser mínimas. Resultado inverso foi encontrado por Souza & Alves (2003), estudando as propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado sob diferentes usos e manejos.

Os resultados referentes ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para a maioria dos atributos químicos analisados para ambas as áreas, exceto para CTC (0,00-0,20 m), na área de pastagem, e P (0,00-0,20 m), pH e Mg (0,40-0,60 m), na área de floresta (Tabelas 2 e 3). A normalidade dos dados não é condição necessária para a aplicação das técnicas de geoestatística (Isaaks & Srivastava 1989).

Nota-se que os atributos químicos do solo ajustaram-se aos modelos de semivariogramas experimentais esférico, exponencial e gaussiano, para as áreas de pastagem e floresta. No caso do K (0,40-0,60 m), na área de pastagem, e K e V% (0,40-0,60 m), na área de floresta, não foi observada dependência espacial.

Quando a variável estudada é espacialmente independente, o seu C_0 (efeito pepita) é igual a $C_1 + C_0$

(patamar), conhecido como efeito pepita puro (EPP). O EPP é importante e indica distribuição casual, ou seja, variabilidade não explicada ou variação não detectada, e pode ocorrer devido a erros de medidas, amostragem ou microvariação não detectada, considerando ser o espaçamento de amostragem utilizado maior que o necessário para detectar a dependência espacial (Cambardella et al. 1994). Para as demais variáveis, o espaçamento amostral utilizado foi adequado para se verificar a dependência espacial.

Houve predominância do ajuste ao modelo de semivariograma exponencial, na área de pastagem, exceto para pH, H+Al e MO (0,00-0,20 m) e H+Al, MO e P (0,40-0,60 m), que ajustaram-se ao modelo esférico (Tabela 4), enquanto, na área de floresta, a maioria das variáveis se ajustou ao modelo esférico, havendo exceções para SB e V% (0,00-0,20 m) e pH (0,40-0,60 m), que ajustaram-se ao modelo exponencial, e H+Al (0,40-0,60 m), que ajustou-se ao modelo gaussiano (Tabela 5).

Segundo Isaaks & Srivastava (1989), os modelos exponenciais são melhor ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades com alta conti-

Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos, em área de pastagem (Manicoré, AM, 2011).

Atributo	Unidade	Modelo	Estatística				
			C_0	C_0+C_1	a (m)	R^2	GDE
<i>Profundidade 0,0-0,20 m</i>							
pH	H ₂ O	Esf	0,01	0,03	60,50	0,98	0,54
H+Al	mmol kg ⁻¹	Esf	82,90	165,90	53,40	0,97	0,50
MO	g dm ⁻³	Esf	3,14	12,78	16,91	0,75	0,75
P	mg dm ⁻³	Esp	0,01	0,04	15,30	0,92	0,63
K	mmol kg ⁻¹	Exp	0,06	0,31	20,70	0,86	0,80
Ca	mmol kg ⁻¹	Exp	0,21	15,53	50,05	0,92	0,47
Mg	mmol kg ⁻¹	Exp	0,96	2,93	25,50	0,82	0,67
SB	mmol kg ⁻¹	Exp	32,00	62,56	39,06	0,87	0,48
CTC	mmol kg ⁻¹	Exp	9,45	42,25	24,30	0,96	0,77
V	%	Exp	0,07	0,27	30,30	0,84	0,73
<i>Profundidade 0,40-0,60 m</i>							
pH	H ₂ O	Exp	0,008	0,01	58,12	0,86	0,49
H+Al	mmol kg ⁻¹	Esf	31,53	63,07	40,00	0,93	0,50
MO	g dm ⁻³	Esf	0,02	0,05	39,00	0,96	0,51
P	mg dm ⁻³	Esf	0,65	1,48	48,60	0,94	0,55
K	mmol kg ⁻¹	EPP	-	-	-	-	-
Ca	mmol kg ⁻¹	Exp	0,81	2,51	15,00	0,56	0,67
Mg	mmol kg ⁻¹	Exp	0,15	0,70	23,70	0,91	0,78
SB	mmol kg ⁻¹	Exp	2,01	7,49	18,90	0,84	0,73
CTC	mmol kg ⁻¹	Exp	6,54	46,63	29,70	0,93	0,86
V	%	Exp	1,71	7,13	28,50	0,94	0,75

C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; GDE: grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação; Exp = exponencial; Esf = esférico; EPP = efeito pepita puro.

Tabela 5. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos, em área de floresta (Manicoré, AM, 2011).

Atributo	Unidade	Modelo	Estatística				
			C_0	C_0+C_1	a (m)	R^2	GDE
<i>Profundidade 0,00-0,20 m</i>							
pH	H ₂ O	Esf	0,01	0,03	38,70	0,97	0,31
H+Al	mmol kg ⁻¹	Esf	131,00	594,20	72,70	0,98	0,22
MO	g dm ⁻³	Esf	7,60	51,27	63,50	0,98	0,14
P	mg dm ⁻³	Esf	0,70	3,81	25,10	0,59	0,18
K	mmol kg ⁻¹	Esf	0,23	0,65	31,80	0,58	0,36
Ca	mmol kg ⁻¹	Esf	0,08	1,70	41,70	0,94	0,04
Mg	mmol kg ⁻¹	Esf	0,69	1,66	55,70	0,89	0,41
SB	mmol kg ⁻¹	Exp	1,52	13,87	48,00	0,96	0,11
CTC	mmol kg ⁻¹	Esf	75,00	598,00	73,00	0,98	0,12
V	%	Exp	3,70	14,62	35,70	0,76	0,25
<i>Profundidade 0,40-0,60 m</i>							
pH	H ₂ O	Exp	0,0009	0,0126	50,16	0,95	0,07
H+Al	mmol kg ⁻¹	Gau	64,0	272,4	84,18	0,98	0,23
MO	g dm ⁻³	Esf	0,10	50,31	92,00	0,99	0,002
P	mg dm ⁻³	Esf	0,01	3,87	79,20	0,95	0,003
K	mmol kg ⁻¹	EPP	-	-	-	-	-
Ca	mmol kg ⁻¹	Esf	0,517	1,79	72,30	0,97	0,28
Mg	mmol kg ⁻¹	Esf	0,194	1,033	60,80	0,98	0,18
SB	mmol kg ⁻¹	Esf	1,30	5,49	63,30	0,91	0,23
CTC	mmol kg ⁻¹	Esf	1,00	342,00	78,80	0,99	0,003
V	%	EPP	-	-	-	-	-

C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; GDE: grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação; Exp = exponencial; Esf = esférico; EPP = efeito pepita puro.

nuidade espacial, ou menos fenômenos erráticos na curta distância. Os modelos esféricos e exponenciais apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns aos atributos do solo (Corá et al. 2004, Montanari et al. 2008, Montomiya et al. 2011). O modelo esférico é o mais citado por pesquisadores como o mais comum em trabalhos relacionados a atributos do solo e da planta (Salviano et al. 1998, Bertolani & Vieira 2001, Cavalcante et al. 2007, Vieira et al. 2011, Lima et al. 2013a). A maioria dos modelos ajustados apresentou altos valores de coeficiente de determinação, expressos pelos valores de R^2 , justificando, assim, os modelos ajustados às variáveis químicas.

O grau de dependência espacial (GDE), expresso pela razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$), foi utilizado segundo classificação de Cambardella et al. (1994). Na área de pastagem, as variáveis foram classificadas, na sua maioria, como moderadas, em ambas as profundidades, exceto para K e CTC (0,00-0,20 m) e Mg e CTC (0,40-0,60 m), que foram classificadas com GDE fraca (Tabela 4). Comportamento diferente foi encontrado na área de floresta, onde predominou GDE forte, havendo exceção somente para pH, K e Mg (0,00-0,20 m) e Ca (0,40-0,60 m), que foram classificados com GDE moderado (Tabela 5). Cambardella et al. (1994) cita que as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo, enquanto a dependência espacial moderada deve-se à homogeneização do solo, ao passo que aos extrínsecos atribui-se fraca dependência.

À distância na qual a semivariância se estabiliza é considerada o alcance da dependência espacial. As variáveis em estudo apresentaram diferentes alcances de dependência espacial, variando de 15,30 m a 60,50 m (0,00-0,20 m) e 15,00 m a 58,12 m (0,40-0,60 m), na área de pastagem, enquanto, na área de floresta, o alcance variou de 25,1 m a 73,0 m (0,00-0,20 m) e de 50,16 m a 52,00 m (0,40-0,60 m).

Amostras coletadas em tais intervalos amostrais, conforme ressaltado por Gupta et al. (1997), representam a variabilidade espacial dos dados. Um intervalo menor do que o alcance proporciona amostras de solo com sobreposição das características espaciais, enquanto um intervalo maior do que o alcance não inclui a variabilidade espacial, e, então, o valor médio obtido destes dados não representa a área estudada (Motomiya et al. 2011). É importante que as amostras sejam coletadas em um intervalo

amostral ótimo, o qual é igual ao alcance da dependência espacial.

O coeficiente de variação permite calcular o número de amostras, com a finalidade de estimar o valor de um atributo, em determinada área, com base na fórmula de Cline (1944). Os dados da Tabela 6 detalham os valores estimados para ambas as áreas em estudo. Já na Tabela 7, são apresentadas estimativas para a determinação média de pontos, para os atributos químicos em estudo, por meio da ferramenta geoestatística, com o uso do parâmetro alcance.

Nesse sentido, quanto maior for o CV, maior será o número estimado de amostras a serem coletadas na área (Souza et al. 2006). Foi observada densidade amostral abaixo do estabelecido na malha, para as variáveis pH e CTC (0,00-0,20 m) e pH (0,40-0,60 m), na área de pastagem, enquanto, na área de floresta, somente o pH, em ambas as profundidades, apresentou densidade amostral abaixo do estabelecido na malha, e o espaçamento, con-

Tabela 6. Valores de densidade amostral e espaçamento ideal, de acordo com a fórmula de Cline (CV%), para os atributos químicos, em área de pastagem e floresta (Manicoré, AM, 2011).

Atributo	Planejamento amostral - Cline			
	Pastagem		Floresta	
	Densidade amostral (pontos ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Densidade amostral (pontos ha ⁻¹)	Espaçamento (m)
<i>Profundidade 0,00-0,20 m</i>				
pH	20,00	37,70	13,00	28,00
H+Al	273,00	22,60	478,00	5,00
MO	102,00	33,10	687,00	4,00
P	351,00	19,00	720,00	4,00
K	2.499,00	50,00	2.496,00	2,00
Ca	2.265,00	48,00	5.737,00	1,00
Mg	833,00	29,00	1.412,00	3,00
SB	1.457,00	38,00	2.633,00	2,00
CTC	60,00	8,00	378,00	5,00
V	1.721,00	41,00	2.577,00	2,00
Média ¹	958,10	32,64	1.713,00	6,00
<i>Profundidade 0,40-0,60 m</i>				
pH	12,00	37,70	6,00	42,00
H+Al	221,00	22,60	324,00	6,00
MO	368,00	33,10	828,00	3,00
P	1.081,00	33,00	415,00	5,00
K	3.461,00	59,00	1.745,00	2,00
Ca	2.583,00	51,00	1.644,00	2,00
Mg	1.538,00	39,00	1.935,00	2,00
SB	1.993,00	45,00	1.516,00	3,00
CTC	166,00	13,00	293,00	6,00
V	2.037,00	45,00	1.277,00	3,00
Média ¹	1.346,00	37,84	1.142,00	7,00

¹ Média da densidade amostral e espaçamento ideal, para avaliação dos atributos químicos, na área de floresta e pastagem.

Tabela 7. Valores de densidade amostral e espaçamento ideal, com base no alcance estimado na análise geoestatística, para os atributos químicos, em área de pastagem e floresta (Manicoré, AM, 2011).

Atributo	Planejamento amostral - Geoestatística			
	Pastagem		Floresta	
	Densidade amostral (pontos ha ⁻¹)	Espaçamento (m)	Densidade amostral (pontos ha ⁻¹)	Espaçamento (m)
<i>Profundidade 0,00-0,20 m</i>				
pH	3,00	61,00	7,00	39,00
H+Al	4,00	53,00	2,00	73,00
MO	35,00	17,00	2,00	64,00
P	43,00	15,00	10,00	32,00
K	23,00	21,00	6,00	42,00
Ca	4,00	50,00	3,00	56,00
Mg	16,00	25,00	4,00	48,00
SB	7,00	39,00	2,00	73,00
CTC	17,00	24,00	8,00	36,00
V	11,00	30,00	7,00	39,00
Média ¹	16,30	33,51	5,10	50,20
<i>Profundidade 0,40-0,60 m</i>				
pH	3,00	58,00	4,00	50,00
H+Al	6,00	40,00	1,00	84,00
MO	7,00	39,00	1,00	92,00
P	4,00	49,00	2,00	79,00
K	-	-	-	-
Ca	44,00	15,00	2,00	72,00
Mg	18,00	24,00	3,00	61,00
SB	28,00	19,00	2,00	63,00
CTC	11,00	30,00	2,00	79,00
V	12,00	29,00	-	-
Média ¹	14,70	30,30	2,12	72,50

¹ Média da densidade amostral e espaçamento ideal, para avaliação dos atributos químicos, na área de floresta e pastagem.

sequentemente, tornou-se menor, sendo, na área de pastagem, de 32,64 m e 37,84, m, respectivamente. Na área de floresta, o valor da média do espaçamento foi menor ainda, com 6,00 m e 7,00 m, respectivamente (Tabela 6).

A média de densidade amostral foi menor na área de pastagem, à profundidade de 0,00-0,20 m. Já à profundidade de 0,40-0,60 m, a área de floresta apresentou menor média de densidade amostral. No entanto, ambas as áreas apresentaram elevado valor de densidade amostral, indicando alta variabilidade nestes ambientes, segundo as informações geradas pela fórmula de Cline (1944).

Conforme os resultados apresentados pela geoestatística, por meio do parâmetro alcance, os valores para os atributos químicos permaneceram, para ambas as áreas, abaixo do estabelecido pela malha, com valores médios de densidade amostral e espaçamento, para a área de pastagem, de 16,3 pontos ha⁻¹ e 33,5 m (0,00-0,20 m) e 14,7 pontos ha⁻¹ e 30,3 m

(0,40-0,60 m), respectivamente, e, para a área de floresta, média de densidade amostral baseada no alcance com valor ainda menor, de 5,1 pontos ha⁻¹ (0,00-0,20 m) e 2,12 pontos ha⁻¹ (0,40-0,60 m), e espaçamento maior, de 50,2 m e 72,5 m, respectivamente (Tabela 7).

Relacionando-se os valores apresentados pela fórmula de Cline (1944) e pelo parâmetro alcance, por meio da geoestatística, pôde-se verificar valores menos discrepantes de densidade amostral e espaçamento, apresentados pelo alcance, assim como valores mais homogêneos, em relação aos atributos avaliados, tanto em profundidade como em diferentes áreas, apresentando, assim, o parâmetro alcance como um indicador mais preciso e seguro, para se estimar valores de densidade amostral e servir como base para futuros estudos relacionados a estes ambientes.

CONCLUSÕES

1. A ferramenta geoestatística forneceu informações adequadas para a compreensão da distribuição espacial, nas áreas de floresta e pastagem.
2. A área com floresta apresentou maior continuidade espacial e a área com pastagem menor densidade amostral, com base no alcance.
3. A distribuição espacial, na área de floresta, apresentou grau de dependência espacial forte, sendo, na área de pastagem, moderado.
4. Os atributos químicos evidenciaram variação na variabilidade espacial, na área de floresta e pastagem.
5. O alcance representou melhor as estimativas para a densidade amostral e espaçamento, na área de floresta e pastagem.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pelo financiamento e apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, A. et al. *Desmatamento na Amazônia: indo além da "emergência crônica"*. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2004.

- BEKELE, A.; HUDNALL, W. H. Spatial variability of soil chemical properties of a prairie-forest transition in Louisiana. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 280, n. 1, p. 7-21, 2006.
- BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 987-995, 2001.
- BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no Cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. *Projeto RadamBrasil*, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro: MME, 1978.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Dependência espacial de atributos químicos em área cultivada com cana-de-açúcar em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 38, n. 4, p. 350-359, 2007.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1329-1339, 2007.
- CHAVES, A. A. A. et al. Indicadores de qualidade de Latossolo Vermelho sob diferentes usos. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 446-454, 2012.
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. *Soil Science*, Baltimore, v. 58, n. 4, p. 275-288, 1944.
- COELHO, E. C. et al. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009.
- CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.
- CORTEZ, J. W. et al. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1207-1216, 2011.
- DIAS-FILHO, M. B. Pastagens cultivadas na Amazônia Oriental Brasileira: processos e causas da degradação e estratégias de recuperação. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Eds.). *Recuperação de áreas degradadas*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas; Universidade Federal de Viçosa, 1998. p. 135-147.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- GREGO, C. R. et al. Variabilidade espacial do solo e da biomassa epígea de pastagem, identificada por meio de geostatística. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 47, n. 9, p. 1404-1412, 2012.
- GUPTA, R. K. et al. Spatial variability and sampling strategies for NO₃-N, P, and K determinations for site-specific farming. *Transactions of the ASAE*, Joseph, v. 40, n. 2, p. 37- 343, 1997.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- LARK, R. M. Designing sampling grids from imprecise information on soil variability: an approach based on the fuzzy kriging variance. *Geoderma*, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 35-39, 2000.
- LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 16-23, 2013a.
- LIMA, J. S. S. et al. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de floculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 539-546, 2013b.
- LONGO, R. M. *Modificações em parâmetros físicos e químicos de latossolos argilosos decorrentes da substituição da Floresta Amazônica e do Cerrado por pastagens*. 1999. 102 f. Tese (Doutorado em Água e Solo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- MARQUES JÚNIOR, J. et al. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, João Pessoa, v. 8, n. 1, p. 153-152, 2008.
- MINITAB statistical software. Release 14.1. State College: Minitab Inc., 2000. 1 CD-ROM.
- MONTANARI, R. et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 40, n. 1, p. 69-77, 2005.
- MONTANARI, R. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos em latossolo e argissolos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1266-1272, 2008.

- MOTOMIYA, A. V. A. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro. *Revista Agrarian*, Dourados, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2011.
- MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 485-496, 2006.
- RIOS, A. J. W. et al. Densidade de amostragem e complexidade de área em levantamentos pedológicos executados no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 38, n. 1, p. 44-52, 2008.
- ROBERTSON, G. P. *GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide*. Plainwell: Gamma Design, 1998.
- RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Soil sampling intensity and spatial distribution pattern of soils attributes and corn yield in no-tillage system. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 852-865, 2012.
- SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 115-122, 1998.
- SANTI, L. A. et al. Distribuição horizontal e vertical de fósforo e potássio em área manejada com ferramentas de agricultura de precisão. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, p. 18-25, maio/jun. 2012.
- SILVA NETO, S. P. et al. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 41-53, 2012.
- SOUZA, Z. M. et al. Amostragem de solo para determinação de atributos químicos e físicos em área com variação nas formas do relevo. *Científica*, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 249-256, 2006.
- SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 133-139, 2003.
- SPEZIA, G. R. et al. Model to estimate the sampling density for establishment of yield mapping. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 449-457, 2012.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, New York, v. 38, n. 1, p. 54-94, 1985.
- UCHÔA, C. N. et al. Modelagem geoestatística da sigatoka-negra e sua relação com a fertilidade do solo. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 27, n. 3, p. 357-362, 2011.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.
- VIEIRA, S. R. et al. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.
- VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Soil Science Plant Analysis*, Philadelphia, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.
- ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um latossolo em sistema de plantio direto. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 57, n. 3, p. 429-438, 2010.
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidade em um Latossolo Vermelho sob semeadura direta. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 1000-1007, 2007.