

Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense

Spatial variability of soil chemical properties of Latosol (Oxisol) cultivated conventionally with Glycine max in the cerrado of the Piauí State

Sammy Sidney Rocha Matias^{1*}, Júlio César Azevedo Nóbrega², Rafaela Simão Abrahão Nóbrega², Fabrício Ribeiro Andrade³, Andréa Cristiane Baptistel⁴.

Resumo: O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo permite manejar a área de acordo com as necessidades da cultura, minimizando ao máximo o custo para produtor. Objetivou-se com o presente estudo avaliar a variabilidade espacial de alguns atributos químicos em Latossolo Amarelo distrófico cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. O trabalho foi realizado no município de Currais, PI, em área de produção de soja, sob sistema de cultivo convencional, safra 2011/2012. Para a realização do estudo foram retiradas amostras de solo na camada de 0,00-0,20 m, em um grid, com intervalo regular de 200 m entre pontos de amostragem, totalizando 50 pontos, sendo cada ponto representado por oito subamostras. Foram avaliados o pH (H₂O), matéria orgânica, fósforo disponível, potássio, cálcio, magnésio, hidrogênio + alumínio. Com os valores obtidos calculou-se a capacidade de trocas de cátions (CTC) a pH 7,0, soma de bases (SB), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). Os menores coeficientes de variação foram verificados para pH, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, tendo todas as variáveis analisadas apresentado dependência espacial, indicando que o número de amostra (50) foi suficiente para mapear a área em estudo, utilizando-se técnicas de geoestatística. A utilização da geoestatística e a construção dos mapas por meio da krigagem permitem identificar zonas de manejo específico, com maiores e/ou menores valores de determinada variável.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Geoestatística. Manejo específico

Abstract: The Knowledge of the spatial distribution of soil characteristics allows handling area in accordance with the needs of the crop, while minimizing to the maximum the cost to the producer. The objective of the present study was to evaluate the spatial variability of some chemical attributes in a dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) cultivated conventionally with soybeans in Piauí Savanna. The work was conducted in the municipality of Currais, PI, Brazil, in an area of soybean production under conventional cropping system, 2011/2012. For the study, soil samples were taken in the 0.00-0.20 m layer, on a grid with regular interval of 200 m between sampling points, totaling 50 points, each point being represented by eight subsamples. Organic matter, pH in water, available phosphorus, potassium, calcium, magnesium, hydrogen and aluminum were evaluated. With the values calculated the cation-exchange capacity (CEC) at pH 7.0, sum of bases (BS), e saturation aluminum (m%) and bases saturation (V%). Lower coefficients of variation were checked for pH, organic matter and cation exchange capacity, and all variables were spatially dependent, indicating that the sample number (50) was sufficient to map the study area, using geostatistical techniques. The use of geostatistics and construct maps by kriging identifying specific areas of management, with larger and/or smaller values of a given variable.

Key words: Soil fertility. Geostatistics. Specific management.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 13/04/2014 e aprovado em 04/12/2014

¹Professor Doutor da Universidade Estadual do Piauí/UESPI, Campus Dep. Jesualdo Cavalcanti de Barros, Rua Prof Joaquina Nogueira Oliveira, s/n, Bairro Aeroporto, Corrente, PI, Brasil, ymmsa2001@yahoo.com.br*.

²Professor Doutor da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, jcanobrega@ufrb.edu.br; rafaela.nobrega@gmail.com.

³Professor Mestre do Instituto Federal de Mato Grosso/IFMT, MG, fabricioandradeagro@gmail.com

⁴Mestrando em Fitotecnia Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, PI, Brasil, andrea@gmail.com.

INTRODUÇÃO

O solo normalmente apresenta variações nos seus atributos, mesmo em áreas consideradas homogêneas e pertencentes a mesma classe de solo (AMARO FILHO *et al.*, 2007). Este fato ocorre porque o material de origem dos solos não é uniforme devido às diferenças com relação à dureza, composição química, cristalização, etc., associado a condições de relevo, clima e organismos que atuam na gênese dos mesmos (SOUZA *et al.*, 2010). Assim, a produtividade das culturas pode ser variável em uma mesma área por menor que seja o grau de variação espacial de determinados atributos.

Além disso, as modernas técnicas de cultivo com mecanização e uso intensivo do solo também contribuem para modificarem seus atributos físicos e químicos, conseqüentemente, influenciando na produção, no equilíbrio dos recursos naturais e na dinâmica da água no solo (GOMES *et al.*, 2007). Segundo Campos *et al.* (2009) e Sanchez *et al.* (2009), a agricultura convencional não leva em conta a aptidão agrícola das terras e, neste caso, as variações ocasionadas pelo uso intensivo do solo, acima da sua capacidade de suporte, leva a necessidade de preparos mais intensivos e adição de insumos em quantidade cada vez maior.

Pode-se acrescentar, também, que, na agricultura convencional as áreas cultivadas são consideradas homogêneas, não levando em conta a variabilidade espacial do solo, implicando no emprego de práticas culturais uniformes, o que inclui sementeira, aplicações de corretivos, fertilizantes e agrotóxicos (AMADO *et al.*, 2007; 2009).

Ao procurar conhecer a variabilidade existente no solo, alguns agricultores estão adotando o novo sistema de produção denominado, no Brasil, de agricultura de precisão. Esse sistema adota procedimentos e tecnologias que permitem aplicar no local correto e momento adequado, a quantidade necessária de insumo à produção agrícola (MOLIN; CASTRO, 2008; SOUZA *et al.*, 2010). Isso é possível porque na agricultura de precisão são aplicados os princípios da geoestatística para caracterizar a variabilidade espacial dos atributos que fazem parte dos fatores de produção agrícola (AMADO *et al.*, 2009; SANCHEZ *et al.*, 2009). Com isso, essa ferramenta permite identificar zonas com restrições químicas que possam estar limitando o rendimento e, posteriormente, realizar a correção de maneira adequada.

Na literatura, é possível encontrar diversos estudos enfocando a variabilidade do solo e sua correlação entre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo com a posição dos mesmos na paisagem (AMARO FILHO *et al.*, 2007; CAMPOS *et al.*, 2009; SANCHEZ *et al.*, 2009). Tais estudos levam em consideração também o preceito do conhecimento das superfícies geomórficas e, conseqüentemente, os efeitos na produção das culturas por

conta da dependência espacial dos atributos com a planta, por meio de interpolação geoestatística, denominado krigagem, para estimar valores em locais não amostrados.

Cruz *et al.* (2010) estudando os atributos físicos, densidade do solo, de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e carbono orgânico em um Argissolo Vermelho-Amarelo, constataram dependência espacial das variáveis analisadas, permitindo seu mapeamento por meio das técnicas de geoestatística. Weirich Neto *et al.* (2006), ao considerarem uma área como homogênea para aplicação de corretivos e fertilizantes em sistema convencional, verificaram por meio da técnica geoestatística que houve desequilíbrio nos nutrientes do solo.

Portanto, a utilização dessa ferramenta em regiões do cerrado piauiense, permitirá entender a variabilidade espacial dos atributos do solo permitindo manejar as áreas conforme necessidade específica, evitando-se prejuízos de ordem econômica e ambiental, como se tem observado em outras regiões. Mediante esse pressuposto, objetivou-se com o presente estudo avaliar a variabilidade espacial das características químicas de um Latossolo Amarelo Distrófico no cerrado piauiense.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Paraíso no período de julho a setembro de 2012, localizada no município de Currais, PI, cujas coordenadas geográficas de referências são 09°00'09" S e 44°60'35" W, com altitude média de 470 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo AW', caracterizado por ser quente e semi-úmido, com temperaturas superiores a 18°C no mês mais frio e com média anual de 27°C. A precipitação média anual fica em torno de 1.200 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a abril. O relevo é suave ondulado com declividade variando de 1 à 8% (PRAGANA *et al.*, 2012).

O estudo foi realizado em uma área comercial de soja cultivada em sistema convencional há seis anos. O solo foi classificado como Latossolo Amarelo distrófico (PRAGANA *et al.*, 2012), com teores médios de 810 g kg⁻¹ de areia, 100 g kg⁻¹ de silte e 90 g kg⁻¹ de argila, na profundidade de 0,00-0,20 m. As amostras de solo foram coletadas com auxílio de um trado elétrico do tipo rosca, na camada de 0,00-0,20 m, distanciados a cada 200 m em uma área de 156,39 ha⁻¹ em duas direções perpendiculares entre si, formando uma malha amostral (Figura 1). No total foram coletadas 50 amostras compostas, formadas a partir de oito sub amostras simples, distanciadas do ponto central de 75 m. Cada ponto foi georeferenciado como forma de demarcar a área e elaborar o mapa de relevo.

Na quantificação das características químicas do solo foram determinados: pH em H₂O, P e K⁺ disponíveis

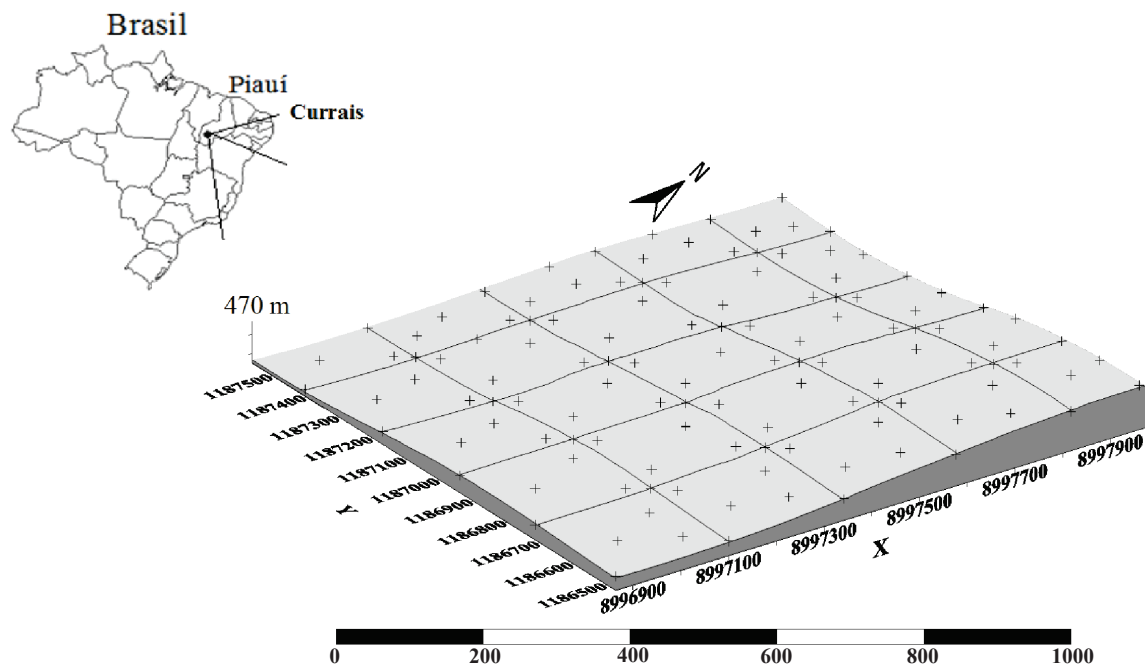


Figura 1 – Localização da área de estudo, mapa de relevo e distribuição dos pontos amostrais na profundidade de 0,00 a 0,20 m em um Latossolo Amarelo distrofico no cerrado piauiense.

Figure 1 – Location of the study area, relief map and distribution of sample points in water depth from 0.00 to 0.20 m in a dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) in cerrado of the Piauí state.

(Mehlich 1), Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) e matéria orgânica de acordo com as recomendações da Embrapa (2011). Com os valores obtidos nas análises do solo, calculou-se a capacidade de trocas de cátions (CTC) a pH 7,0, soma de bases (SB), percentagem de saturação por alumínio (m) e percentagem de saturação por bases (V).

Para a análise estatística dos dados, inicialmente realizou-se um estudo exploratório, calculando medidas de localização (média, mediana, mínimo e máximo), de variabilidade (coeficiente de variação) e de tendência central (assimetria e curtose) para verificar a normalidade dos atributos avaliados. Para a análise do coeficiente de variação (CV), usou-se a classificação de Warrick e Nielsen (1980), com variabilidade baixa para valores menores de 12%, média para valores entre 12 e 60% e alta para valores maiores que 60%.

Para determinar a variabilidade espacial considerou-se a teoria das variáveis regionalizadas, a qual dispõe de diferentes métodos de análise de variação espacial, sendo uma delas o semivariograma. Os semivariogramas de cada atributo foram obtidos mediante o programa GS+ (ROBERTSON, 2008). Foram ajustados aos dados os seguintes modelos:

(a) esférico (Esf), $g^*(h) = C_0 + C_1 [1,5(h/a) - 0,5 (h/a)^3]$ para $0 < h < a$ e $g^*(h) = C_0 + C_1$ para $h > a$;

(b) exponencial (Exp), $g^*(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h/a)]$ para $0 < h < d$, em que d é a distância máxima na qual o semivariograma é definido e;

(c) gaussiano (Gau), $g^*(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h^2/a^2)]$.

Por meio destes modelos foi realizada a predição de cada atributo em zonas não amostradas mediante krigagem, representados em mapas de contorno, utilizando o programa Surfer (2000). A escolha dos modelos teóricos foi efetivada observando-se a soma do quadrado dos resíduos (SQR), o coeficiente de determinação (R^2) e, posteriormente, o coeficiente de correlação obtido pela técnica da validação cruzada.

Conjuntamente com os mapas e a análise de correlação linear de Pearson, verificou-se a correlação entre os atributos do solo. A classificação do grau da dependência espacial (GDE) foi feita com base na razão entre o efeito pepita e o patamar (C_0/C_0+C), sendo considerada forte para GDE superior de 75%, moderada para GDE entre 25 e 75% e fraca para GDE inferior a 25% (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise descritiva (Tabela 1), verifica-se que os valores de média e mediana foram semelhantes, a assimetria e a curtose apresentaram valores próximos à zero, indicando uma aproximação da distribuição normal. Constatou-se que todos os atributos analisados podem ser representados pela média, em razão dos mesmos terem demonstrado

Tabela 1 - Análise descritiva dos atributos químicos na camada 0,00 a 0,20 m em Latossolo Amarelo distrófico no cerrado piauiense**Table 1**- Descriptive analysis of chemical attributes in the layer from 0.00 to 0.20 m in a dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) in cerrado of the Piauí state

Estatística	pH (H ₂ O)	¹ MO		² P	³ SB	⁴ CTC _T	⁵ V	⁶ m
		g	dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³		-----%-----	
Média	5,90	14,50		6,00	1,80	6,67	28,27	12,81
Mediana	5,90	14,00		6,30	1,80	6,60	28,00	12,32
Desvio padrão	0,17	0,91		6,47	0,29	0,64	4,87	6,30
Mínimo	5,70	14,00		5,10	1,27	5,60	17,00	12,81
Máximo	6,40	16,00		8,90	2,49	8,10	38,00	29,83
Assimetria	0,57	0,07		0,20	0,11	0,28	0,17	0,67
Kurtose	-0,26	-0,72		0,72	0,59	0,48	-0,20	0,18
⁷ CV (%)	2,97	6,30		4,82	15,70	9,72	17,23	49,21

¹MO: Matéria Orgânica; ²P: Fósforo disponível; ³SB: Soma de bases trocáveis; ⁴CTC_T: Capacidade de troca catiônica total; ⁵V: Saturação por bases; ⁶m: Saturação por alumínio; ⁷CV (%): Coeficiente de variação.

¹MO: Organic matter; ²P: Phosphorus available; ³SB: Sum of bases exchangeable; ⁴CTC_T: Total cation-exchange capacity; ⁵V (%): Bases saturation; ⁶m (%): Aluminum saturation; ⁷CV (%): Coefficient of variation.

distribuição de frequência do tipo normal, confirmado pela assimetria positiva, entre 0,07 e 0,67 e o coeficiente de kurtose negativo, variando entre -0,20 e -0,72, com exceção da saturação por alumínio (m), que obteve valor positivo de 0,18. Com esses resultados de distribuição de frequência do tipo normal, os dados ficaram, no geral, em concordância com os observados por outros autores (CAMPOS *et al.*, 2009; SANCHEZ *et al.*, 2009; SIQUEIRA *et al.*, 2010) que estudaram variabilidade espacial por meio de atributos do solo.

Ao observar a média dos dados, pode-se inferir que o solo possui baixa fertilidade de acordo com a saturação por bases, menor que 50%. Esse resultado indica que o manejo do solo não está melhorando a disponibilidade dos nutrientes para a planta. Ao interpretar a variação dos dados em torno da média, pode-se constatar o menor CV para o pH, fósforo (P) e matéria orgânica (MO) em comparação a m, V e SB, indicando a falta de interação com a adubação/calagem e do manejo dos restos vegetais, conforme a literatura (VIEIRA *et al.*, 2011; BURAK *et al.*, 2012).

Os valores do CV para os atributos do solo variaram de baixo a muito alto (DALCHIAVON *et al.*, 2012) ou de baixo a alto (WARRICK; NIELSEN, 1980). Os critérios de Warrick e Nielsen (1980) tem sido adotados em muitos trabalhos relacionados com estudos de solo (AMARO FILHO *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2010).

Essas duas formas de classificar o CV em estudos de variabilidade do solo e a sua aplicação irão depender do grau de variação ou discrepância que possa ser obtido das variáveis estudadas. Por exemplo, para valores discrepantes, recomenda-se utilizar os critérios de Warrick e Nielsen (1980) como forma de evitar várias subdivisões dos CV's. Além disso, Campos *et al.* (2009), Sanchez *et al.* (2009) e Siqueira *et al.* (2010) descrevem em seus trabalhos que a

variabilidade dos atributos químicos do solo é reflexo das interações dos processos de sua formação, de práticas de manejo do solo e da cultura, com impacto principalmente nas camadas superficiais do solo.

A análise de correlação revelou que os atributos químicos (Tabela 2), apresentaram significância tanto a $p < 0,01$ quanto a $p < 0,05$ de probabilidade pelo teste F, demonstrando correlação negativa entre: pH e CTC_T (-0,412); MO e V (-0,314); SB e m (-0,479); CTC_T e V (-0,415) e V e m (-0,506).

Observa-se, ainda, que a relação linear entre SB e V e teor de MO e CTC_T corroboram com as obtidas por Montezano *et al.* (2006) em uma área cultivada e manejada homogênea. A elevada correlação positiva entre SB e V (0,801) (Tabela 2) pode ser explicada, uma vez que o valor V é expresso pela relação entre SB e CTC_T. Da mesma forma observou-se correlação positiva entre teor de MO e CTC_T, corroborando com o estudo realizado por Souza *et al.* (2010) em área cultivada com cana-de-açúcar. Isso se deve, principalmente, pela MO ser o principal contribuinte para o aumento da CTC_T, sobretudo, em solos altamente intemperizados como os Latossolos.

Na Tabela 3 encontram-se o efeito pepita, o patamar, o alcance, os modelos de semivariograma ajustados aos dados experimentais, bem como, a relação efeito pepita/patamar e coeficiente de regressão da validação cruzada das variáveis analisadas. Observa-se que todas as variáveis analisadas ajustaram-se a algum modelo de semivariograma e que não houve efeito pepita puro para nenhum dos parâmetros analisados, indicando distribuição aleatória na zona de estudo e independência espacial (CRUZ *et al.*, 2010). Segundo Dalchiavon *et al.* (2012), a falta de independência espacial no estudo denota que o comportamento dessas variáveis regionalizadas não foi aleatório e que as distâncias

Tabela 2 - Correlação linear de Pearson entre os atributos químicos na camada 0,00 a 0,20 m em Latossolo Amarelo distrófico no cerrado piauiense

Table 2- Pearson linear correlation between the chemical properties of Piauí in the layer from 0.00 to 0.20 m in dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) in cerrado of the Piauí state

	pH (H ₂ O)	MO	P	SB	CTC _T	V
MO	-0,108					
P	0,020	-0,212				
SB	0,064	-0,011	-0,199			
CTC _T	-0,412**	0,565**	-0,139	0,137		
V (%)	0,301*	-0,314*	-0,084	0,801**	-0,415**	
m (%)	-0,105	0,07	0,072	-0,479**	0,081	-0,506**

MO: Matéria Orgânica; P: Fósforo disponível; SB: Soma de bases trocáveis; CTC_T: Capacidade de troca catiônica total; V (%): Saturação por bases; m (%): Saturação por alumínio; * e ** Significativo a ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), respectivamente, pelo teste F.

MO: Organic matter; P: Phosphorus available; SB: Sum of exchangeable; CTC_T: Total cation-exchange capacity; V (%): Base saturation; m (%): Aluminum saturation * and ** Significant at ($p < 0.01$ and $p < 0.05$), respectively, by F test.

Tabela 3- Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para pH (H₂O), matéria orgânica (MO), fósforo (P), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica total (CTC_T), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) na camada 0,00 a 0,20 m em Latossolo Amarelo distrófico no cerrado piauiense

Table 3- Parameters of semivariogram models adjusted for pH (H₂O), organic matter (OM), phosphorus (P), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC_T), bases saturation (V) and saturation by aluminum (m) in the layer from 0.00 to 0.20 m in dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) in cerrado of the Piauí state.

Variáveis	Modelo	C ₀	C ₀ + C ₁	GDE	Alcance (m)	R ²	CRVC	
							b	a
pH (H ₂ O)	Esférico	0,011	0,035	31,43	905	0,51	1,07	-0,45
MO	Exponencial	0,005	1,148	0,44	579	0,80	0,96	0,63
P	Gaussiano	2,900	47,240	6,14	322	0,84	1,00	-0,26
SB	Exponencial	0,012	0,098	12,24	420	0,61	0,94	0,10
CTC _T	Gaussiano	0,064	0,475	13,47	339	0,96	0,97	0,19
V	Esférico	6,450	33,870	19,04	1.242	0,80	0,99	0,11
M	Gaussiano	0,100	41,130	0,24	410	0,78	0,18	10,81

C₀: Efeito pepita; C₀ + C₁: Patamar; GDE: Grau de dependência espacial; R²: Coeficiente de determinação do modelo; CRVC: Coeficiente de regressão da validação cruzada; b: Coeficiente angular; a: Intercepto.

C₀: Nugget effect; C₀ + C₁: Level; GDE: spatial dependence degree; R²: Coefficient of determination of the model; CSRC: cross validation regression coefficient; b: angular coefficient; a: Intercept.

entre pontos utilizadas na malha geoestatística foram suficientes para o estudo da variabilidade espacial.

Os resultados da análise geoestatística demonstram que os atributos químicos apresentaram dependência espacial (Tabela 3 e Figura 2). Os dados de pH, MO, P, SB, CTC_T, V e m, ajustaram-se aos modelos esférico, exponencial, gaussiano, exponencial, gaussiano, esférico e gaussiano, respectivamente. No geral, estudos relacionados com a variabilidade espacial de atributos do solo têm mostrado que os modelos esférico e exponencial tem sido os mais frequentes (AMADO *et al.*, 2009; CAMPOS *et al.*, 2009; SANCHEZ *et al.*, 2009; SIQUEIRA *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2010; DALCHIAVON *et al.*, 2012) confirmando, assim, que os modelos ajustados no presente estudo estão de acordo com as pesquisas realizadas sobre variabilidade do solo.

Segundo Campos *et al.* (2009) e Siqueira *et al.* (2010), o efeito pepita (C₀) explica o valor da não variância dos dados, ocasionada possivelmente, por erros de medições ou variações dos atributos que não podem ser detectados na escala amostral. Nesse trabalho, os valores maiores foram encontrados para P e V, sendo o menor para a MO (Tabela 3 e Figura 2).

Em relação ao patamar (C₀ + C₁), observa-se que os atributos apresentaram variância com amplitude de 0,035 para o pH (H₂O) e 47,24 para o P disponível, evidenciando que entre esses valores de amplitude a estacionariedade é real e contribui para a definição da variabilidade espacial dos pontos amostrados. De acordo com Campos *et al.* (2009) e Siqueira *et al.* (2010), os modelos ajustados aos dados dos atributos químicos são considerados transitivos, por possuírem patamar. Ou seja, a partir de um

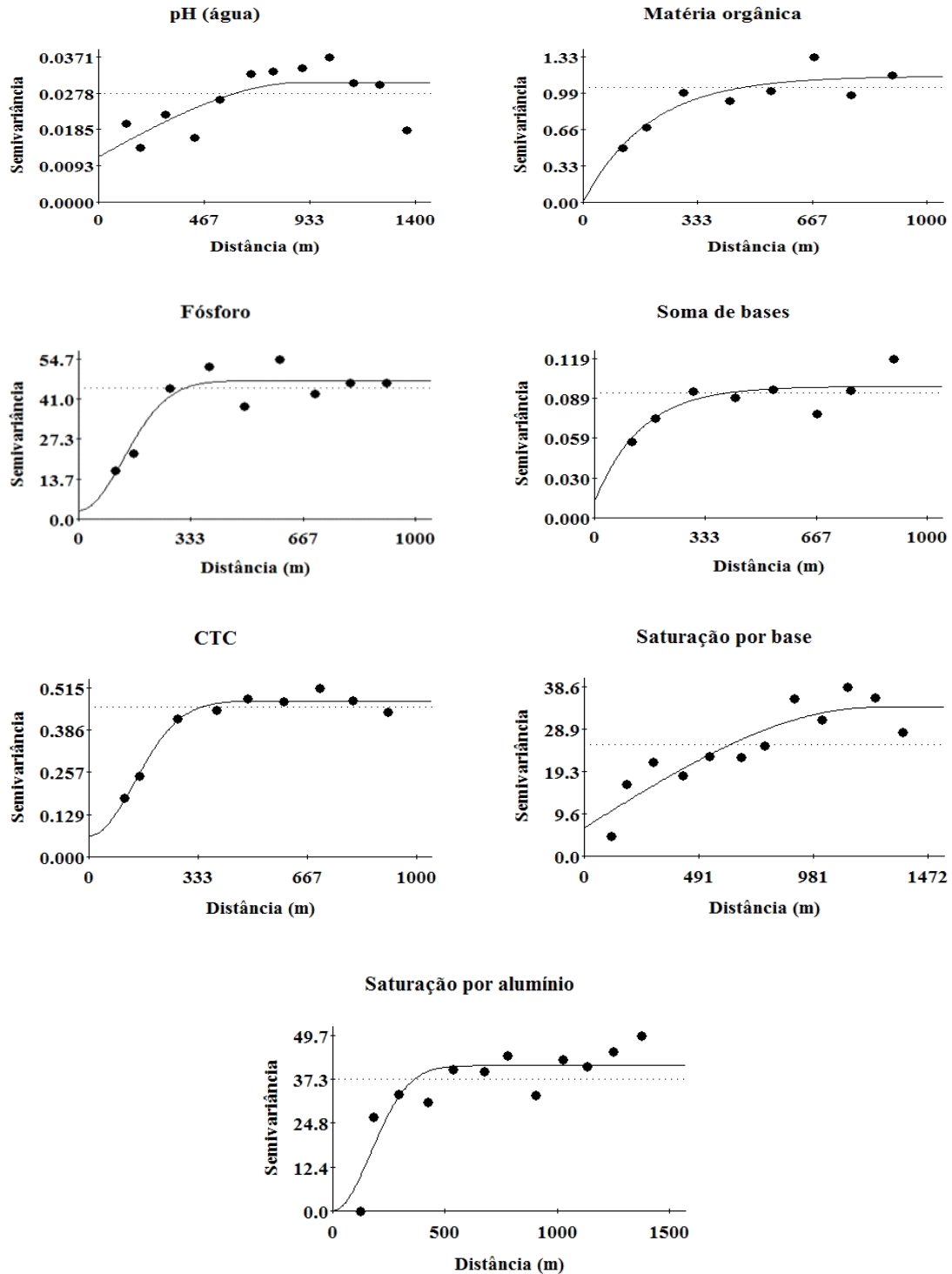


Figura 2 - Semivariogramas de pH (H_2O), matéria orgânica (MO), fósforo (P), soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica total (CEC_T), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), na camada 0,00 - 0,20 m de um Latossolo Amarelo distrofico do cerrado piauiense.

Figure 2 - semivariograms for pH (H_2O), organic matter (OM), phosphorus (P), Sum Bases (BS), cation exchange capacity (CEC_T), bases saturation (V) and aluminum saturation (m), the layer from 0.00 - 0.20 m in dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) in cerrado of the Piauí state

determinado valor da distância entre amostras, não existe mais dependência espacial (a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância). Segundo esses autores, a existência do patamar possibilita identificar a estacionaridade dos resultados dos pontos amostrados entre os pares de dados, tornando-se os valores constantes, confirmado pela semivariância que se aproxima da variância total dos dados.

Nesse sentido, o grau de dependência espacial obtido pela análise da relação $C_0/(C_0 + C_1)$ mostrou forte dependência para todos os atributos, com exceção do pH que obteve moderado grau de dependência espacial, segundo a classificação de Cambardella *et al.* (1994). Portanto, as distribuições dos atributos químicos no espaço não são aleatórias, uma vez que todos apresentaram valores moderados ou fortes para o grau de dependência espacial. Isso demonstra que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais. Outros autores também encontraram forte dependência espacial para características químicas do solo (AMADO *et al.*, 2009; CRUZ *et al.*, 2010; DALCHIAVON *et al.*, 2012).

A forte dependência espacial obtida nos atributos são intensamente influenciados por propriedades intrínsecas do solo, como textura e mineralogia, já aqueles que apresentaram fraca dependência recebem maior influência de fatores externos, devido a aplicações de fertilizantes, preparo e cultivo do solo (CAMBARDELLA *et al.*, 1994; CAMPOS *et al.*, 2009; SOUZA *et al.*, 2010). O desempenho dos semivariogramas analisados pela relação decrescente dos seus respectivos coeficientes de determinação espacial (R^2) foi o seguinte: a CTC_T foi o atributo que apresentou melhor ajuste ($R^2=0,96$), seguido do P ($R^2=0,84$). Todos os valores do grau de dependência espacial obtiveram os melhores ajustes na validação cruzada, com coeficientes de regressão (CRVC) mais próximos de um (b) e zero (a), exceto para m, sendo este o que apresentou menor valor para o grau de dependência espacial e coeficiente de regressão na validação cruzada.

No estudo dos semivariogramas o alcance é um parâmetro importante, que indica a distância máxima em que uma variável está correlacionada espacialmente. Ou seja, as determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição aleatória e, por essa razão, são independentes entre si, devendo ser aplicada a estatística clássica (MACHADO *et al.*, 2007). O menor valor de alcance foi de 322 m para o P e o maior para V com 1.242 m. Weirich Neto *et al.* (2006), trabalhando com a variabilidade espacial de uma área sob plantio direto visando diagnosticar a necessidade de fertilizantes e calcário, encontraram, para a CTC_T , o mesmo ajuste de modelo e alcance de 330 m, valor este bem próximo do encontrado no presente estudo, que foi de 339 m.

O alcance é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância na qual uma variável regionalizada apresenta continuidade espacial, sendo que a partir desta distância, o comportamento espacial da variável passa a ser totalmente aleatório (LEMOS FILHO *et al.*, 2008). Seu conhecimento é crucial à agricultura de precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para monitorar o maquinário agrícola quando da aplicação de insumos com taxas variáveis (DALCHIAVON *et al.*, 2011).

O valor do alcance geoestatístico pode influenciar a qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação, delimitando a extensão da correlação espacial entre as amostras (MENDES *et al.*, 2008). Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade local (LEMOS FILHO *et al.*, 2008; CRUZ *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2010).

Desse modo, a partir dos ajustes dos semivariogramas foi possível construir os mapas de krigagem (Figura 3), permitindo definir zonas específicas de manejo da fertilidade do solo, que possibilitam a aplicação de insumos com taxas variadas, visando à homogeneização da fertilidade do solo, que são fundamentais para a agricultura de precisão.

Os mapas demonstram isolinhas ou contornos produzidos por interpolação utilizando-se a técnica de krigagem ordinária. As linhas fechadas e próximas caracterizam a área com maior variabilidade, enquanto que a presença de linhas espaçadas demonstra a condição de menor variabilidade. Portanto, a krigagem configura-se como uma ferramenta essencial para se estabelecer o manejo de maior proximidade para cada nutriente.

As correlações obtidas na Tabela 2 são refletidas nos mapas dos atributos químicos da Figura 3, onde se verificam elevados teores de MO e SB, e elevada CTC_T e V, respectivamente. Com as variáveis que apresentaram dependência espacial foi possível utilizar a krigagem para estimar valores em locais não amostrados, utilizando-se dos parâmetros dos semivariogramas ajustados. O conhecimento dos valores de alcance e as localizações das áreas onde estão concentrados os maiores e/ou menores valores de determinada variável química, por meio dos mapas são importantes para o planejamento do manejo da fertilidade do solo, tanto na área convencional como na agricultura de precisão. Assim, na agricultura de precisão é possível a aplicação do geoprocessamento nestes mapas, com a finalidade de maximização da aplicação de fertilizantes e corretivos agrícolas nos solos do cerrado.

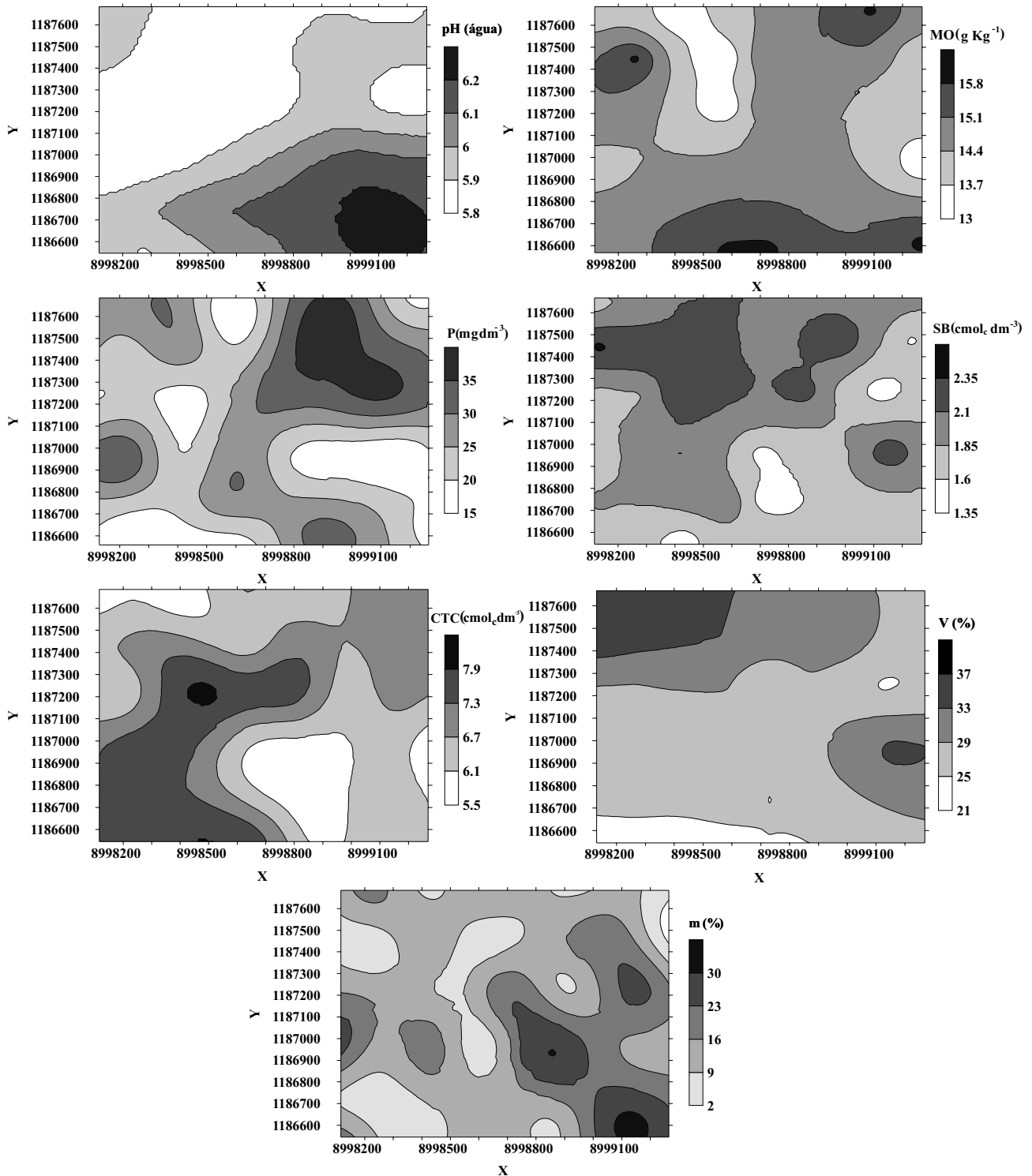


Figura 3 - Mapas da distribuição espacial pH (H₂O), matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica total (CTC_T), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), na camada de 0,00 a 0,20 m em um Latossolo Amarelo distrófico do cerrado piauiense.

Figure 3 - Maps of the spatial distribution of pH (water), organic matter (OM), available phosphorus (P), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC_T), bases saturation (V) and aluminum saturation (m) in the layer from 0.00 - 0.20 m in dystrophic Yellow Latosol (Oxisol) in cerrado of the Piauí state.

CONCLUSÕES

Os menores coeficientes de variação foram verificados para o pH, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica e todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, indicando que o número de amostra (50) foi

suficiente para mapear a área em estudo, utilizando-se técnicas de geoestatística.

A utilização da geoestatística e a construção dos mapas por meio da krigagem permitem identificar zonas de manejo específico, com maiores e/ou menores valores de determinada variável.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

AMADO, T. J. C.; PONTELLI, C. B.; SANTI, A. L.; VIANA, J. H. M.; SULZBACH, L. A. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007.

AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.

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

BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. **Bragantia**, v. 71, n. 4, p. 538-547, 2012.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; NOVAK, J. M.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTARANI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 297-304, 2009.

CRUZ, J. S.; ASSIS JUNIOR, R. N.; MATIAS, S. S. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 271-278, 2010.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

GOMES, N. M.; FARIA, M. A.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007.

LEMO FILHO, L. C. A.; OLIVEIRA, E. L.; FARIA, M. A.; ANDRADE, L. A. B. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 2, p. 193-202, 2008.

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 591-599, 2007.

MENDES, A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 1, p. 19-27, 2008.

- MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 6, p. 567-573, 2008.
- MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 839-847, 2006.
- PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NÓBREGA, J. C. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; COSTA, J. A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 36, n. 5, p. 1591-1600, 2012.
- ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences (version 9 for windows)**. Plainwell: Gamma Design Software, 2008. 179p.
- SANCHEZ, R. B.; MARQUES JR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Using landforms to predict spatial and temporal variability of soil and orange fruit attributes. **Geoderma**, v. 155, n. 1-2, p. 55-66, 2010.
- SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; SIQUEIRA, D. S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 250-256, 2010.
- SURFER FORWINDOWS. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers: user's guide**. Release 8.0. New York: Golden Software, 2000. Software.
- VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.
- 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.
- WEIRICH NETO, P. H.; SVERZUT, C. B.; SCHIMANDEIRO, A. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 338-343, 2006.