

# Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo<sup>1</sup>

Spatial variability of the phosphorus and granulometric fractions of a red-yellow oxisol

Samuel de Assis Silva<sup>2\*</sup>, Julião Soares de Souza Lima<sup>3</sup>, Gustavo Soares de Souza<sup>2</sup>, Rone Batista de Oliveira<sup>4</sup> e Alessandra Fagioli da Silva<sup>5</sup>

**Resumo** - Este trabalho foi realizado para estudar a variabilidade espacial do fósforo, estimando-a através de cokrigagem, tendo como co-variáveis as frações granulométricas do solo. O estudo foi realizado na fazenda experimental do INCAPER-ES. O solo foi amostrado na projeção da copa da cultura e na profundidade de 0-0,20 m, em uma malha irregular com 109 pontos. Os dados foram, inicialmente, submetidos a uma análise descritiva e de correlação. Por meio da geoestatística realizou-se o ajuste dos variogramas. O P apresentou correlação significativa com as frações areia e argila indicando que áreas com maiores concentrações de argila apresentam menor disponibilidade desse nutriente. Ambas as frações possuem igual eficiência como co-variável na estimativa dos níveis de P no solo.

**Palavras-chave** - Geoestatística. Solos. Teor de Fósforo. Latossolos. Interpolação.

**Abstract** - This study was conducted to study the spatial variability of phosphorus, estimating it through cokriging taking as covariables the size fractions of soil. The study was conducted at the experimental farm INCAPER-ES. The soil was sampled in the canopy projection of culture and depth of 0-0.20 meters in an irregular mesh with 109 points. The data were initially submitted to a descriptive analysis and correlation. Through geostatistics was made the adjustment of the variograms. The P showed significant correlation with the sand and clay fractions indicating that areas with higher concentrations of clay have lower availability of this nutrient. Both fractions have equal performance as co-variable in the estimate of the levels of P in the soil.

**Key words** - Geostatistics. Soils. Match content. Oxisols. Interpolation.

\* Autor para correspondência

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 13/04/2009; aprovado em 04/11/2009

Pesquisa desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal do Espírito Santo

<sup>2</sup>Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa-MG, Brasil, 36570-000, samuel-assis@hotmail.com, gdsouza@hotmail.com

<sup>3</sup>Dep. de Engenharia Rural, UFES, Alegre-ES, Brasil, limajss@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Programa de pós-graduação em Energia na Agricultura, UNESP, Botucatu-SP, Brasil, rbatista@fca.unesp.br

<sup>5</sup>Programa de pós-graduação em Agronomia, UNESP, Botucatu-SP, Brasil, alefagioli@hotmail.com

## Introdução

O fósforo (P) tem sido apontado como um dos nutrientes mais limitantes ao rendimento das culturas, apesar de sua relativa abundância na crosta terrestre, pois seus teores na solução do solo além de muito baixos, são insuficientes para suprir as necessidades das plantas.

Este nutriente está envolvido em processos de fixação, que podem ser permanentes para a maioria dos solos tropicais. Solos bem drenados, freqüentemente apresentam baixa disponibilidade de P devido à tendência deste elemento de formar compostos estáveis de alta energia de ligação e baixa solubilidade com a fase sólida mineral do solo (RANNO et al., 2007).

O solo pode assumir o papel de fonte ou de dreno de P, quando apresentar reservas favoráveis à planta ou quando competir com a planta, fixando parte do P adicionado como fertilizante. Com o aumento do intemperismo, principalmente em condições tropicais, os solos mudam de fonte para dreno, tornando-se mais eletropositivos e com grande capacidade de adsorver e reter ânions, tais como os fosfatos. Neste contexto, destacam-se os Latossolos que, via de regra, apresentam-se bastante lixiviados, ácidos e muito pobres em P disponível (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno ou fonte. Dessa forma, solos muito intemperizados (oxídicos), com elevado teor de argila, exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) exercerão o papel de fonte (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Esta interação entre atributos físicos e químicos do solo influenciam diretamente o crescimento e o desenvolvimento das culturas. Desta forma, a avaliação da variabilidade espacial destes atributos têm se tornado importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo do solo, que procuram aumentar a produtividade agrícola (CARR, 2003; MINASNY; McBRATNEY, 2007).

A variabilidade espacial dos solos é resultado de processos pedogenéticos e pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas. A variabilidade de atributos do solo é uma preocupação antiga e, ainda hoje, diversos autores dedicam-se a pesquisar os efeitos dessa variação, já que esta pode afetar decisivamente os resultados em pesquisas (CARVALHO et al., 2003; SILVA et al., 2003; SILVA et al., 2007; SOUZA et al., 2004).

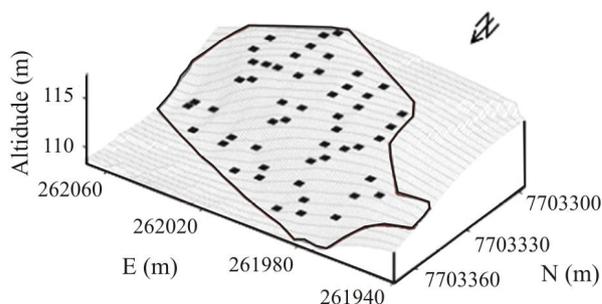
Muitos autores (ANGELICO, 2006; BISHOP; LARK, 2006; COUTO; KLAMT, 1999; SUBRAMANYAM; PANDALAI, 2008; WANG et al., 2007) utilizaram a cokrigagem para estudar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo, demonstrando que as características químicas e granulométricas revelavam dependência entre si. A cokrigagem descreve a variação espacial e/ou temporal simultânea de duas variáveis aleatórias que estão fortemente associadas entre si. Portanto, ela é utilizada quando existe dependência espacial para cada variável em estudo e também entre as variáveis, tornando possível utilizar esta técnica na estimativa de valores não amostrados.

Neste trabalho, pretendeu-se estimar, por meio do método de cokrigagem, os níveis de fósforo no solo utilizando as frações granulométricas como variável auxiliar.

## Material e métodos

A área de estudo localiza-se no município de Cachoeiro de Itapemirim - ES, no distrito de Pacotuba, na Fazenda Experimental Bananal do Norte pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), na latitude de 20° 45' 17,31" S e longitude de 41° 17' 8,86" W.

As amostras de solo foram coletadas numa área cultivada há cinco anos com café conilon (*Coffea canephora* Pierre x Froenher), situada no terço superior de uma elevação com topo arredondado e vertente com perfil convexo, sendo o solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com textura argilosa. A amostragem de solo foi realizada na camada de 0-0,20 m em uma malha irregular de aproximadamente 10.000 m<sup>2</sup>, com 109 pontos amostrais, com declividade em torno de 30% (Figura 1). As coordenadas de cada ponto amostral foram definidas com auxílio de um GPS topográfico.



**Figura 1** - Modelo digital de elevação (MDE) da área com a distribuição dos pontos amostrais

As frações granulométricas do solo (argila, silte e areia) e os níveis de fósforo (P) foram determinadas em laboratório, de acordo com metodologias apresentadas pela EMBRAPA (1997).

Inicialmente, os dados foram submetidos a uma análise descritiva, exploratória e também à análise de correlação para determinar a relação entre as variáveis. Para a verificação de candidatos a valores discrepantes (*outliers*) foram analisados os quartis superiores e inferiores e testada a normalidade pelo teste Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade (W). Em seguida realizou-se a análise geoestatística, dentro da qual se buscou avaliar o atendimento da hipótese de estacionalidade assumida (GONÇALVES et al., 2001; VIEIRA et al. 1983) por meio de ajuste do variograma estimado pela seguinte equação:

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

Em que:  $N(h)$  é o número de pares de valores  $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$  separados por um vetor  $h$ , e  $x_i$  é uma posição espacial da variável  $Z$ . À nuvem de pontos  $[h, \gamma(h)]$  ajusta-se uma função matemática, cujos parâmetros são conhecidos como: efeito pepita ( $C_0$ ), correspondendo ao valor da interseção no eixo das semivariâncias; patamar ( $C_0 + C_1$ ), aproximadamente igual ao valor da variância dos dados; e alcance ( $a$ ), que representa a distância na qual o variograma atinge o valor do patamar e a região de dependência espacial entre as amostras (VIEIRA et al., 1983).

Para a escolha do modelo adotado, baseou-se na minimização da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e no coeficiente de determinação múltipla ( $R^2$ ) do ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais. Na seqüência, também foi utilizado o  $R^2$  da validação cruzada ( $R^2$ -VC) (valores observados versus valores estimados), como critério de escolha.

Para análise do índice de dependência espacial (IDE%), foi utilizada a relação definida pelo *software* GS+ ( $C_1/C_0 + C_1$ ) e os intervalos que consideram a dependência espacial fraca ( $IDE \leq 25\%$ ); moderada ( $25\% < IDE \leq 75\%$ ) e forte ( $IDE > 75\%$ ).

Os variogramas utilizados neste trabalho foram escalonados pela variância dos dados como sugeriram Vieira et al. (1991), para facilitar sua comparação.

Para estimar valores de areia, argila e P em locais não amostrados e confeccionar os mapas de isolinhas, utilizou-se a krigagem ordinária. Este interpolador geoestatístico utiliza-se de um estimador linear não-

viciado com mínima variância e leva em consideração a estrutura de variabilidade espacial encontrada para o atributo sendo definido pela seguinte equação:

$$z^*(x_i, x_i + h) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, x_i + h) \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

Em que  $Z^*(x_i, x_i + h)$  é o estimador para um ponto  $(x_i, x_i + h)$  da região, e  $\lambda_i$  são os pesos usados na estimativa.

Para espacialização de P em função das frações granulométricas, utilizou-se a extensão multivariada da krigagem, conhecida como cokrigagem. Esta estimativa pode ser mais precisa do que a krigagem de uma variável simples, quando o variograma cruzado mostrar dependência entre as duas variáveis (VIEIRA, 2000).

Na cokrigagem (VIEIRA, 2000), para estimar valores,  $Z_2^*$ , para qualquer local,  $X_0$ , o valor estimado deve ser uma combinação linear de ambos  $Z_1$  e  $Z_2$ , ou seja:

$$Z_2^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} z(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} z_2(x_{2j}) \quad (4)$$

Em que  $N_1$  e  $N_2$  são os números de vizinhos de  $Z_1$  e  $Z_2$ , respectivamente, e  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os pesos associados a cada valor de  $Z_1$  e  $Z_2$ . Tomando  $z_1(x_{1i})$  e  $z_2(x_{2j})$  como sendo uma realização das funções aleatórias  $Z_1(X_{1i})$  e  $Z_2(X_{2j})$ , respectivamente, e assumindo estacionaridade de ordem 2, o estimador pode ser reescrito em:

$$Z_2^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z(X_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(X_{2j}) \quad (5)$$

Expressando que a estimativa da variável  $Z_2$  deverá ser uma combinação linear de ambos  $Z_1$  e  $Z_2$ , com os pesos  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e a correlação cruzada entre elas.

A análise geoestatística, bem como os métodos de interpolação, foram realizadas no *software* GS+ sendo utilizados, na indicação da melhor co-variável para estimar P, os valores de erro padrão da estimativa, fornecidos pela validação cruzada. Os mapas foram confeccionados utilizando o *software* Surfer.

## Resultados e discussão

A análise descritiva geral para as variáveis é apresentada no Tabela 1. Os valores de simetria encontram-se distantes de zero para as variáveis argila (assimétrica à esquerda) e silte (assimétrica à direita). Para o coeficiente de curtose, que mostra a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente à curva normal, os dados argila e silte apresentaram distribuição platicúrtica, com achatamento acentuado da curva de distribuição normal para o silte.

A normalidade dos dados foi observada apenas para a areia. As demais variáveis apresentam distribuição não normal pelo teste Shapiro-Wilk's ( $p < 0,05$ ). Como salientado por Warrick e Nielsen (1980), em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste a uma distribuição teórica é apenas aproximado. A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, sendo conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que pode comprometer os resultados.

A areia apresentou a menor amplitude total, seguida da argila, revelando maior uniformidade, caracterizada pelo menor coeficiente de variação, quando comparadas às demais variáveis. De acordo com Souza et al. (2004), argila e areia dos latossolos são atributos estáveis, ou seja, modificam-se pouco ao longo do tempo por ação do intemperismo, portanto apresentam valores menores de CV. Entretanto, todos os atributos apresentaram média variação de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), de baixa para  $CV < 12\%$ ; média de  $12\% < CV < 60\%$  e alta para  $CV > 60\%$ . A maior variação foi observada para o silte, justificada pela sua maior amplitude, podendo, também, estar relacionada com a sua movimentação no solo, no escoamento superficial durante o processo erosivo. Além disso, o seu método de determinação, pelo risco de incorporar parte da variabilidade existente nos atributos areia e argila, pode ter contribuído para essa maior variabilidade.

Ainda na Tabela 1, verifica-se a correlação linear entre o teor de P no solo e argila, silte e areia. Apesar de numericamente baixa, a correlação entre P com argila e areia é significativa ( $p < 0,05$ ), indicando que é plausível usar tais variáveis como auxiliar na determinação da distribuição espacial do fósforo. O mesmo não foi observado para o silte, onde a correlação foi não significativa, inviabilizando sua utilização como co-variável.

Os valores da correlação negativos de P com a argila e positivos com a areia mostram que a sua disponibilidade é maior em locais onde os valores de argila são menores e onde, conseqüentemente, os valores de areia são maiores. Solos com elevado teor de argila, exercem predominantemente função reducionista da disponibilidade de P devido a processos de adsorção e fixação, enquanto aqueles com menor concentração de argila, promovem aumento da disponibilidade deste elemento (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Os variogramas experimentais utilizados para avaliar a dependência espacial das variáveis em estudo estão apresentados na Figura 2. Assumiu-se, nesse caso, estacionaridade intrínseca uma vez que não se verificou tendência de variação para as variáveis.

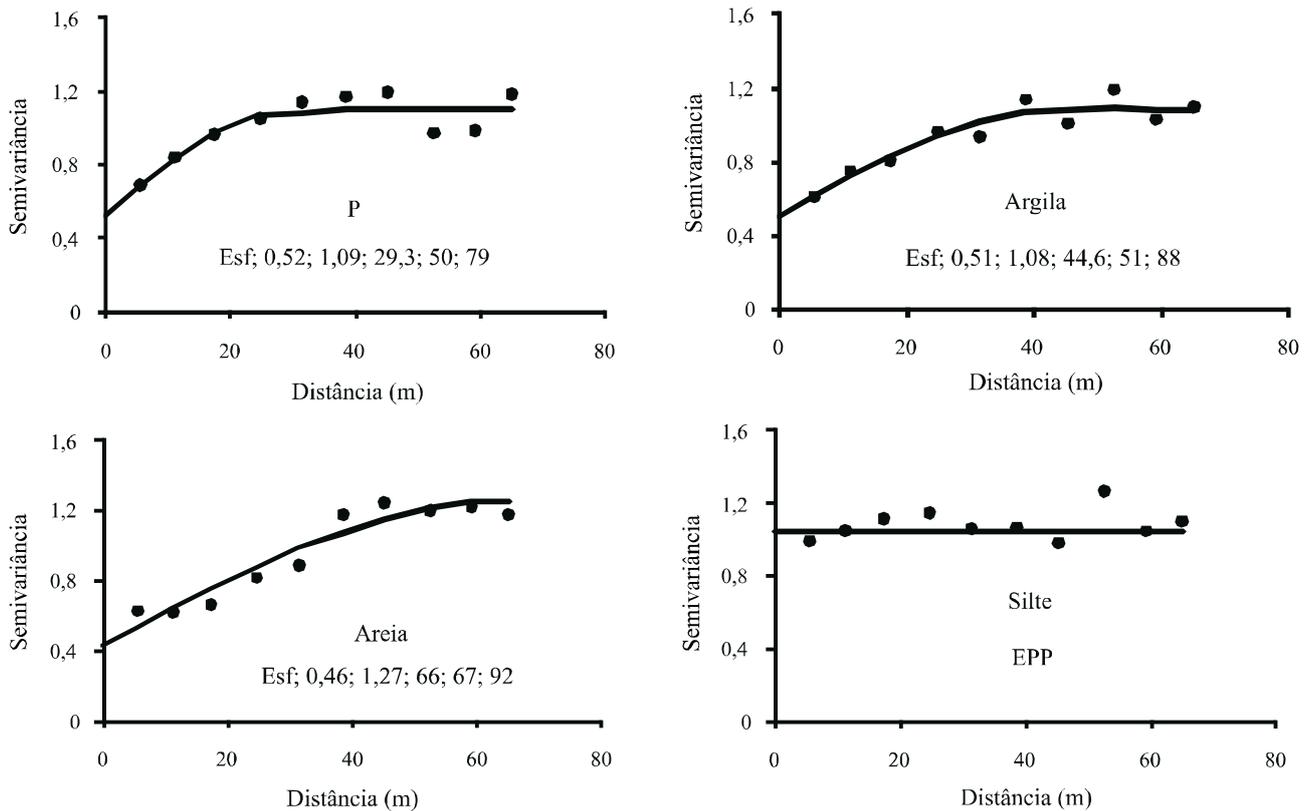
Os resultados da análise geoestatística indicam que os atributos P, argila e areia apresentam dependência espacial na camada estudada, ajustando-se ao modelo esférico (Esf) com alcances de 29,3; 44,6 e 66,0 m, respectivamente. A areia apresentou o menor CV e conseqüentemente maior continuidade espacial, caracterizada pelo seu maior alcance. O silte ajustou-se ao modelo efeito pepita puro, indicando ausência de dependência espacial.

O índice de dependência espacial (IDE) para P, argila e areia apresentam moderada dependência espacial, com valores entre 25 a 75%. Valores semelhantes foram observados por Lima et al. (2007) em um Latossolo

**Tabela 1** - Estatística descritiva geral para as variáveis argila, silte, areia total e fósforo (P)

Variáveis	Estatística									
	Média	Mediana	Mín.	Máx.	CV(%)	s	C <sub>s</sub>	C <sub>k</sub>	w	r
Argila	413,48	411,00	101,60	602,80	20,27	83,82	-0,34	0,76	*	-0,28*
Silte	188,66	191,61	14,18	508,55	38,09	71,87	0,65	3,27	*	0,14ns
Areia	397,86	397,45	259,82	567,83	15,57	61,94	0,04	-0,09	ns	0,21*
P	4,24	4,00	1,00	8,00	31,89	1,35	-0,01	-0,17	*	

Mín. = mínimo; Máx. = máximo; s = desvio padrão; CV(%) = coeficiente de variação; C<sub>s</sub> = coeficiente de simetria; C<sub>k</sub> = coeficiente de curtose; W\* distribuição não normal pelo teste Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade e W; ns distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade; \* correlação significativa com o P a 5% de probabilidade; ns correlação não significativa com o P a 5% de probabilidade



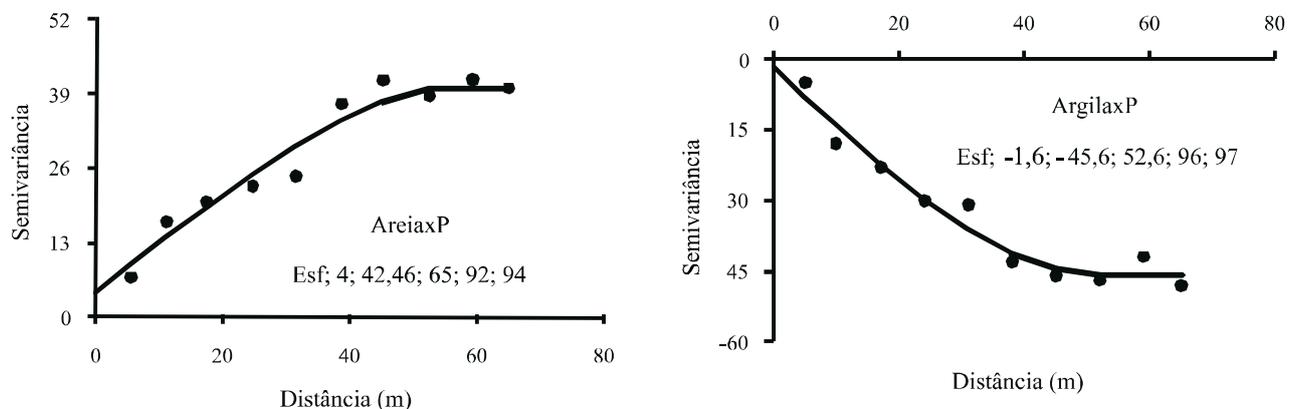
**Figura 2** - Modelos e parâmetros dos variogramas escalonados (Modelo,  $C_0$ ;  $C_0+C$ ; a; IDE;  $R^2$ ) do teor de P no solo e das frações granulométricas (argila, silte e areia)

Vermelho Amarelo cultivado com pimenta-do-reino, e por Souza et al. (2004) em um Latossolo Vermelho eutroférrico sob cultivo de cana-de-açúcar.

Em situações em que existe a correlação espacial entre as duas variáveis, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se as informações de ambas, expressas no

variograma cruzado (Figura 3). Como a correlação linear entre P e argila e areia foi significativa, o variograma cruzado entre essas variáveis foi examinado.

O modelo ajustado para ambos foi o esférico (Esf), mostrando que a relação espacial entre P e areia e argila existe. Esta relação espacial, medida pelo efeito



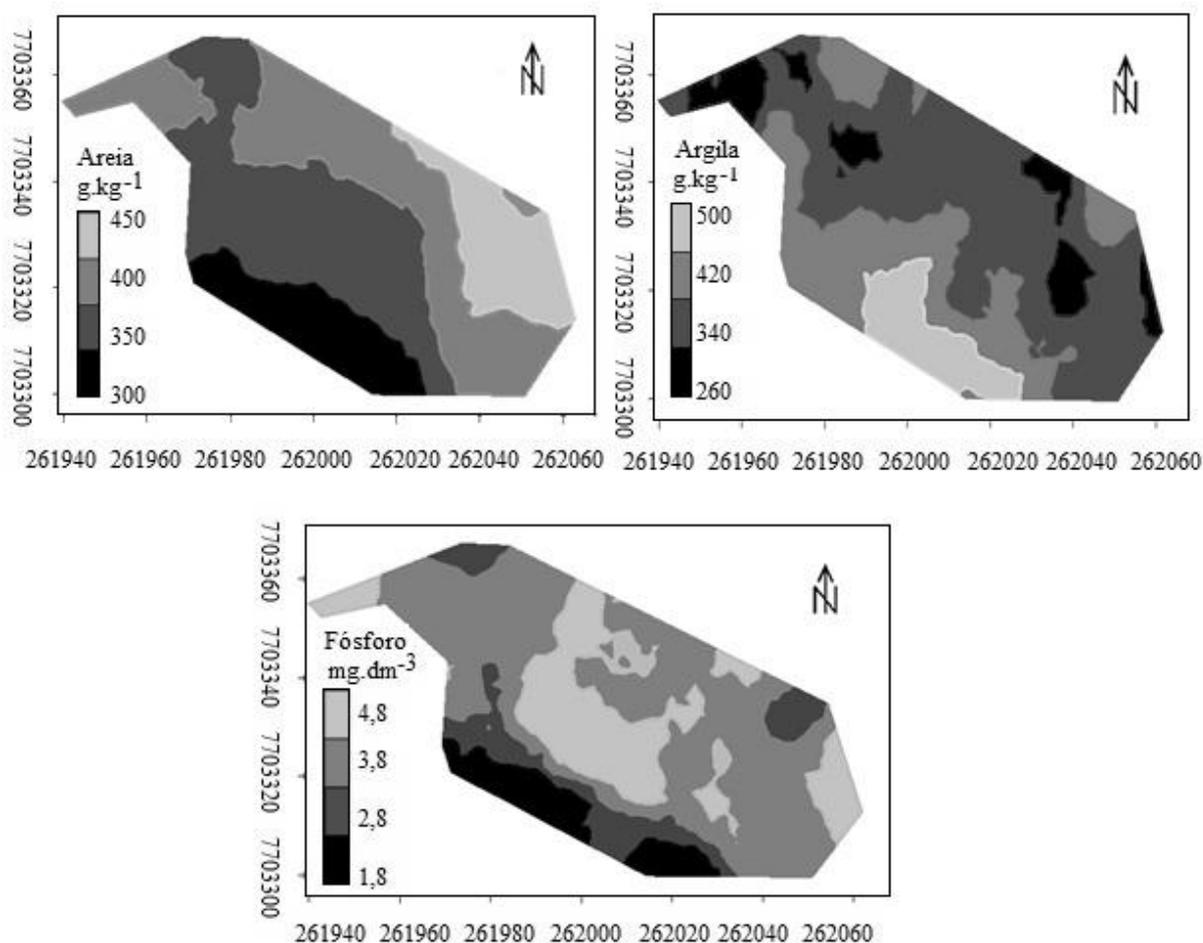
**Figura 3** - Modelos e parâmetros ( $C_0$ ;  $C_0+C$ ; a; IDE;  $R^2$ ) dos variogramas cruzados de P com areia e argila

pepita ( $C_0 = 4$  para Areia x P e  $C_0 = -1,6$  para Argila x P), é baixa (quanto maior o efeito pepita, mais fraca é a dependência espacial do atributo em questão), indicando que, as variáveis argila e areia podem ser usadas como variáveis auxiliar na obtenção de estimativas em lugares não amostrados para o teor de P em toda a área em estudo, dentro do alcance dos variogramas cruzados.

Ao analisar os variogramas cruzados, observa-se uma semelhança entre eles, apesar dos valores negativos da semivariância para a relação Argila x P. Observa-se um comportamento espacial semelhante entre os mesmos, caracterizado pelo mesmo modelo de ajuste (esférico) e por alcances relativamente próximos. Isto ocorre devido à distribuição inversa das frações granulométricas dos solos, ou seja, onde os valores de argila são elevados há uma menor concentração de areia, sendo o inverso verdadeiro, conforme observado nos mapas de isolinhas da Figura 4.

Este comportamento fica melhor evidenciado quando se utiliza técnicas mais apuradas de análise, o que subsidia a tomada de decisão, permitindo procedimentos de manejo mais adequados. Para Subramanyam e Pandalai (2008), a análise geoestatística multivariada é fundamental na análise de processos cujas características envolvem interrelação entre variáveis, as quais atuam de forma combinada, sendo que a utilização da cokrigagem promove consideráveis ganhos de informação nas diversas áreas das ciências agrárias, principalmente no entendimento das dinâmicas dos nutrientes no solo (LAROCQUE et al., 2006).

O teor de areia cresce no sentido sul-norte, sendo os maiores valores observados nas porções mais baixas da área, enquanto que os valores de argila seguem comportamento inverso, com decréscimo no sentido sul-norte o que também é observado para os valores de P.



**Figura 4** - Mapas de isolinhas para a variável areia, argila e P, estimados pelo método da krigagem ordinária

Tal característica das frações granulométricas na área indica que a eficiência da estimativa de P é semelhante quando utilizamos argila ou areia como co-variável, conforme observamos nos mapas de isolinhas, gerados por cokrigagem (Figura 5) os quais são praticamente idênticos, afirmando a semelhança da utilização de qualquer uma das frações na sua estimativa.

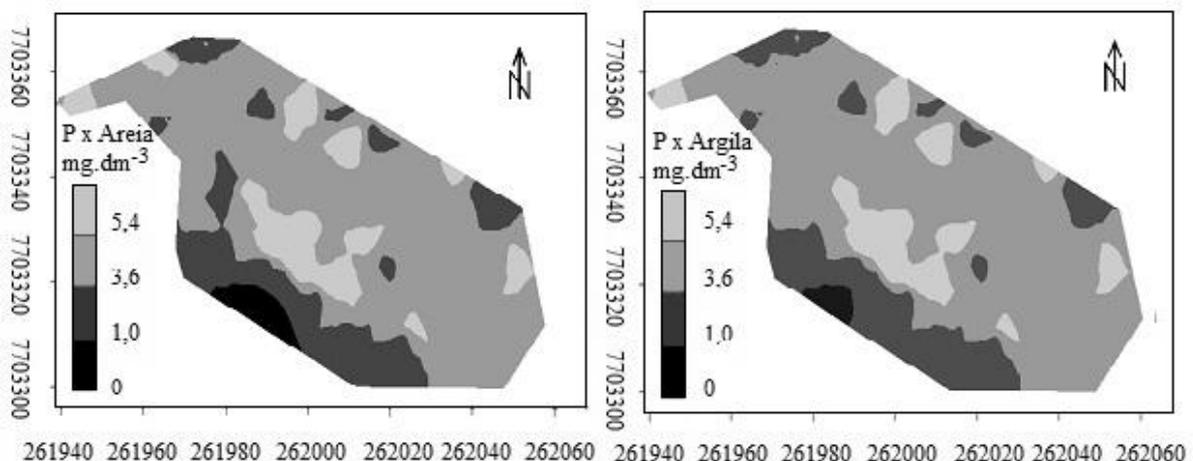
Tal fato é algo de relevante interesse, pois torna-se possível reduzir o número de amostragens com a utilização de qualquer uma das co-variáveis para o mapeamento dos níveis de P na área mantendo a eficiência da caracterização química do solo, conforme Passarella et al. (2003). Resultados semelhantes foram observados por Angelico (2006) estudando o desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo (pH e Mn em função dos níveis de MO).

Na Figura 5 fica evidente o comportamento do P em relação às frações granulométricas, indicando maior disponibilidade associada a menores valores de argila, uma vez que a sua concentração na solução, considerada como disponível às plantas, depende, em grande parte, do processo de adsorção na superfície

dos constituintes do solo, entre eles a argila e, solos de textura mais argilosa apresentaram maior capacidade de adsorção de fósforo. Simbahan et al. (2006) encontraram comportamento semelhante para o carbono orgânico do solo.

Tal fato se deve ao fato da fração argila ter relação mais estreita com o P dos solos, devido à sua capacidade de retê-lo deixando-o indisponível para as plantas, influenciando a interdependência entre o P-trocável ou lábil, denominado fator quantidade (Q), e o P-solução, denominado fator intensidade (I), que varia de acordo com o teor e qualidade dessa fração (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Áreas que apresentam elevado valor de argila apresentam valores menores de areia, sendo o inverso verdadeiro. A relação fósforo-areia, encontrada nesse trabalho é resultado da relação inversa existente entre argila e areia, não havendo relação entre fósforo e areia. O que imobiliza ou disponibiliza fósforo é o tipo de argila e a natureza de sua estrutura, se cristalina ou amorfa. O aumento na disponibilidade não foi causado pelo aumento no teor de areia, e sim pela diminuição no teor de argila.



**Figura 5** - Mapas de isolinhas de P, estimados por cokrigagem utilizando areia e argila como co-variável

## Conclusões

O P apresentou correlação significativa negativa com a fração argila indicando que áreas com maiores concentrações dessa fração granulométrica apresentam menor disponibilidade deste nutriente.

A utilização das frações areia e argila como co-variável para estimatimar os níveis de P na área, em locais não amostrados, foi eficiente, o que permite estimar a distribuição espacial do P no solo com base nas frações granulométricas, diminuindo o número de análise laboratorial para o P.

## Referências

- ANGELICO, J. C. Desempenho da cokrigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 06, p. 931-936, 2006.
- BISHOP, T. F. A.; LARK, R. M. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. **Geoderma**, v. 133, n. 01-02, p. 87-106, 2006.
- CARR, J. R. Comments About Autokrigeability in Cokriging Based on an Empirical Study. **Mathematical Geology**, v. 35, n. 02, p. 217-225, 2003.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 04, p. 695-703, 2003.
- COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2331-2339, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 23, n. 05, p. 1149-1157, 2001.
- LAROCQUE, G. *et al.* Conditional Gaussian co-simulation of regionalized components of soil variation. **Geoderma**, v. 134, n. 01-02, p. 1-16, 2006.
- LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R. B.; QUARTEZANI, W. Z. Variabilidade espacial de atributos físicos de um solo sob cultivo de pimenta-do-reino. **Engenharia na Agricultura**, v. 15, n. 03, p. 291-298, 2007.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. **Geoderma**, v. 140, n. 04, p. 324-336, 2007.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- PASSARELLA, G. *et al.* Cokriging optimization of monitoring network configuration based on fuzzy and non-fuzzy variogram evaluation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 82, n. 01, p. 1-21, 2003.
- RANNO, S. K. *et al.* Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 01, p. 21-28, 2007.
- SILVA, V. R. *et al.* Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 06, p. 1013-1020, 2003.
- SILVA, S. A. *et al.* Análise espacial da erosão hídrica em um latossolo vermelho amarelo sob cultivo de café conilon. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 4, p. 335-342, 2007.
- SIMBAHAN, G. C. *et al.* Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. **Geoderma**, v. 132, n. 03-04, p. 471-489, 2006.
- SOUZA, Z. M. *et al.* Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 34, n. 06, p. 1763-1771, 2004.
- SUBRAMANYAM, A.; PANDALAI, H. S. Data Configurations and the Cokriging System: Simplification by Screen Effects. **Math. Geosci**, v. 40, n. 04, p. 425-443, 2008.
- VIEIRA, S. R. *et al.* Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 03, p. 1-75, 1983.
- VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I. Mapeamento das precipitações máximas prováveis para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 01, p. 93-98, 1991.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-53. 1 v.
- WANG, G.; GERTNER, G.; ANDERSON, A. B. Sampling and Mapping a Soil Erosion Cover Factor by Integrating Stratification, Model Updating and Cokriging with Images. **Environ Manage**, v. 39, n. 01, p. 84-97, 2007.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 385 p.