

AVALIAÇÃO DE INTERPOLADORES ESTATÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

EVALUATION OF STATISTIC AND DETERMINISTIC INTERPOLATORS IN THE ESTIMATE OF ATTRIBUTES OF THE SOIL IN AGRICULTURE OF PRECISION

Samuel de Assis Silva¹; Julião Soares de Souza Lima²;
Gustavo Soares de Souza¹; Rone Batista de Oliveira³

RESUMO

A obtenção da correta distribuição espacial para atributos do solo é relevante no planejamento agrícola, no que diz respeito à instalação e manutenção das culturas. O objetivo desse trabalho foi comparar métodos de interpolação estatísticos (krigagem ordinária) e métodos determinísticos (inverso do quadrado da distância) na estimativa de CTC e V% em um Latossolo vermelho amarelo distrófico. O estudo foi realizado no Estado do ES na fazenda experimental do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), em uma grade irregular com 109 pontos. Os dados foram coletados na camada de 0-0,20 m na projeção da copa das plantas, na parte superior do declive. A performance dos interpoladores foi obtida e comparada usando o critério do erro médio. As observações são espacialmente dependentes até um alcance máximo de 14,1 m, considerando a isotropia. O IDW apresentou maior erro na estimação dos dados, entretanto sua diferença em relação à KRIG foi pequena para ambas as variáveis.

Palavras-chave: Geoestatística, métodos de interpolação, zonas de manejo

ABSTRACT

The obtaining of the correct space distribution for attributes of the soil is relevant in the agricultural planning, in what concerns to the installation and maintenance of the cultures. The objective of that work was to compare statistical interpolation methods (ordinary kriging) and deterministic methods (inverse square distance) in the estimate of CTC and V% in a dystrophic yellow-red Latossolo. The study was accomplished in the State of Experimental "Hands on" of the Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), in an irregular grading with 109 points. The data were collected in the layer of 0 - 0,20 m in the projection of the cup of the plants, in the superior part of the slope. The performance of the interpolators was obtained and compared using the criterion of the medium mistake. The observations are dependent in space until a maximum reach of 14,1 m, considering the isotropy. IDW presented larger mistake in the estimate of the data; however its difference in relation to KRIG was small for both variables.

Key-word: Geostatistics, interpolation methods, handling areas.

INTRODUÇÃO

Medir atributos de solo é muito importante em diversos contextos, tais como, levantamento e manejo do solo, planejamento de esquemas de amostragem e gerenciamento de práticas agrícolas,

etc. A obtenção da correta distribuição espacial para tais atributos é relevante no planejamento agrícola, no que diz respeito à instalação e manutenção das culturas.

Com o advento da mecanização e da produção em larga escala, os campos cultivados passaram

¹ Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), Deptº Engenharia Rural, Caixa Postal 16, CEP: 29500-000 Alegre-ES, E-mail: samuel-assis@hotmail.com

² Deptº Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES, E-mail: jsslima@yahoo.com.br

³ Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP, E-mail: roneantiversus@yahoo.com.br

a ser tratados de maneira uniforme. As taxas de aplicação de fertilizantes passaram a ser calculadas com base em valores médios de fertilidade e a aplicação feita uniformemente em toda a extensão do campo. Como resultado, áreas com maior nível de fertilidade são adubadas em excesso e áreas com solos mais pobres não são corrigidas aos níveis desejados (Tiepo *et al.* 2007).

Inúmeros métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade, estão disponíveis na literatura (Carvalho *et al.*, 2002). Estudos feitos por Kravchenko & Bullock, (1999) demonstram que a ponderação do inverso da distância é mais fácil de se realizar, enquanto a Krigagem consome mais tempo e é mais complicada de se aplicar. Por outro lado, a Krigagem faz uma descrição mais acurada da estrutura espacial dos dados e produz valiosa informação sobre a distribuição da estimativa do erro, por ser entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

Entretanto, existem trabalhos que demonstram ser o inverso da distância mais eficiente que a Krigagem. Wollenhaupt *et al.* (1994), para mapear a disponibilidade de P e K no solo, demonstraram superioridade no método do inverso da distância. Também Gotway y Hartford (1996) mostraram maior eficiência de tal método no mapeamento do teor de matéria orgânica e NO_3^- no solo.

Creutin & Obled (1982) e Tabios & Salas (1985) fizeram comparações entre algumas técnicas de interpolação e a Krigagem para a distribuição da precipitação anual. A Krigagem mostrou-se mais eficiente. Warrick *et al.* (1988) obtiveram melhores resultados para a Krigagem, quando a compararam com o método do inverso da distância, para mapear a produtividade de tomate e algumas propriedades do solo. Laslett *et al.* (1987) conseguiram resultados mais satisfatórios na obtenção do pH do solo, usando a Krigagem, quando comparada com o método do inverso da distância.

Fietz *et al.* (2000) avaliaram a variabilidade espacial e confeccionaram mapas de necessidade de calcário de uma área de Latossolo Vermelho, localizada na Embrapa Agropecuária Oeste (em Dourados-MS), com base em técnicas de geoestatística. Por meio de um semivariograma dos dados, confeccionou-se uma malha utilizando a técnica de Krigagem. Com os valores interpolados, elaborou-se

um mapa de aplicação localizada de calcário. Os dados de necessidade de calcário apresentaram dependência espacial com nível moderado, com efeito pepita e patamar de 27 % e alcance de 165 m. Com esses resultados, a geoestatística mostrou-se valiosa na interpolação de dados e, conseqüentemente, na confecção de mapas utilizados na agricultura de precisão.

Diante de todo o exposto, objetivou-se com esse trabalho analisar, comparativamente, a eficiência da krigagem ordinária e do inverso do quadrado da distância na estimativa de CTC e V% em um Latossolo vermelho amarelo distrófico.

MATERIAIS 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), entre latitudes de 20° 45' 17.31" S e longitudes de 41° 17' 8.86" W. O clima da região é do tipo Cwa, com verão chuvoso e inverno seco de acordo com a classificação de Köpen. A região apresenta alta sazonalidade climática, sendo que as estações de baixas e altas pluviosidades estão bem definidas.

O experimento foi conduzido em uma área cultivada com a cultura de café conilon (*Coffea canephora* Pierre x Froenher), variedade Robusta Tropical, com espaçamento de 2,90 x 0,90 m, situada no terço superior e médio de uma elevação com topo arredondado e vertente com perfil convexo com declividade média de 33,52 graus, sendo o solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura argilosa (EMBRAPA, 1997).

A amostragem foi realizada na profundidade de 0,0-0,20 m, na projeção da copa das plantas, em um Latossolo vermelho amarelo distrófico textura argilosa.

Dentro de uma área de aproximadamente 10.000 m², criou-se uma grade irregular com 109 pontos amostrais, definidos como células cada uma composta de cinco plantas. As coordenadas de cada ponto amostral foram adquiridas com auxílio de um GPS topográfico.

O manejo nutricional do café, como calagem e adubação do solo, foi realizado através de aplicações uniformes em toda área, por meio de recomendação de dose única.

A determinação da CTC e V(%) foi realizada em laboratório segundo metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

A geoestatística foi utilizada para avaliar a variabilidade espacial dos atributos estudados, sendo a dependência espacial expressa através do semivariograma, estimado pela Equação 1:

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

onde N(h) é o número de pares de valores medidos Z(x_i), Z(x_i+h), separado pela distância h, se a variável for escalar. O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ versus os valores correspondentes de h é chamado de semivariograma.

Para estimar valores de CTC e V(%) em locais não amostrados e confeccionar os mapas, utilizou-se de dois métodos de interpolação a saber: krigagem ordinária (KRIG), que é um método geoestatístico, que se utiliza de um estimador linear não-viciado com mínima variância e leva em consideração a estrutura de variabilidade encontrada para o atributo e é definido pela seguinte equação:

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

sujeito a: $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

em que Z*(x_i, x_i+h) é o estimador para um ponto (x_i, x_i+h) da região e λ_i são os pesos usados na estimativa.

O outro método utilizado foi o inverso do quadrado da distância (IDW) que é um interpolador determinístico univariado de médias ponderadas, dado pela seguinte equação descrita por Mello *et al.* (2003):

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} * x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)}$$

em que: x_p = atributo interpolado; x_i = valor do atributo do i-ésimo ponto de amostragem; d_i = distância

euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado; e n = número de amostras.

A análise geoestatística, bem como os métodos de interpolação, foi realizada no software GS + (Robertson, 2000) e os mapas confeccionados utilizando o software Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

A performance dos interpoladores foi obtida e comparada com base nos valores da validação cruzada, segundo Dirks *et al.* (1998) e Mello *et al.* (2003), conforme Equação 2:

$$e = \frac{|V_R - V_P|}{V_P} \cdot 100$$

$$e_m = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (2)$$

em que: Z_{esti} é o valor estimado pelo método da validação cruzada e Z_i é o valor do atributo medido em campo na amostragem.

Primeiramente, os dados observados passaram por uma análise descritiva e exploratória. Testou a normalidade dos dados pelo teste Shapiro-Wilk's (P < 0,05), bem como a presença de valores discrepantes (outliers).

Na análise geoestatística os modelos teóricos para ajuste foram: esférico, exponencial, gaussiano, linear sem patamar e efeito pepita puro. A escolha do modelo seguiu os critérios adotados pelo software GS+, que utiliza a menor soma dos quadrados do resíduo (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R²). O ajuste dos dados a partir do semivariograma possibilitou definir os seguintes parâmetros: efeito pepita (C0), patamar (C0+C) e alcance (a) e o índice de dependência espacial (IDE). O IDE é calculado pela relação [C/(C0+C)], conforme critérios estabelecidos por Zimback (2001), e assume os seguintes intervalos: fraco para valores de IDE ≤ 25%; moderado entre 25% < IDE < 75% e forte para IDE > 75%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise exploratória foi possível identificar a presença de dados discrepantes (outliers) nos dados das variáveis CTC e V(%), bem como sua influência sobre as medidas de posição

e dispersão. Nesse caso, optou-se pela retirada de tais valores discrepantes.

Nos resultados da análise descritiva (Tabela 1) observa-se que, para ambas as variáveis, as medidas de tendência central (média e mediana) são muito próximas. Tal fator indica simetria na distribuição dos dados, fato que é confirmado ao analisar os valores do coeficiente de assimetria próximos de zero.

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados da análise descritiva da CTC e V%, após a retirada dos valores discrepantes (“outliers”).

As variáveis apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk’s a 5% de probabilidade. De acordo com Cressie (1991) a normalidade dos dados não é exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente extremidades muito alongadas, o que poderia comprometer as análises.

A variabilidade dos dados, medida pelo coeficiente de variação (CV), baseada nos limites propostos por Warrick & Nielsen (1980), para classificação de atributos do solo, que consideram: variabilidade baixa ($CV < 12\%$); média ($12\% < CV < 60\%$) e alta ($CV > 60\%$), foi médias para ambas as variáveis estudadas.

Os resultados da análise geoestatística (Figura 1 e 2) indicam que as variáveis apresentam dependência espacial na profundidade de 0-0,20 m, ajustando-se o modelo esférico (CTC) e exponencial (V%).

Uma maior continuidade espacial foi detectada para V%, com alcance de 14,10 m em comparação com a CTC, cujo alcance foi de 9,90 m. Os pontos localizados numa área de raio menor ou igual ao alcance são mais similares e estão dependentes espacialmente entre si. Neste caso amostragens de solo para a variável V% devem ser realizadas a distância maior que para CTC, para que as amostras

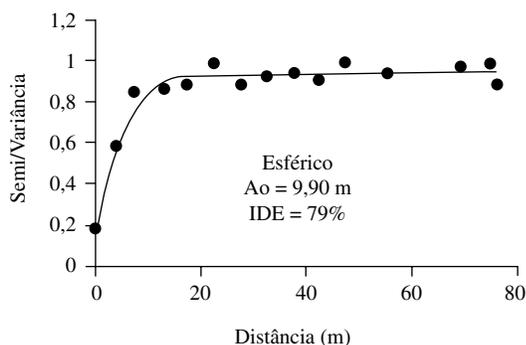


Figura 1. Semivariograma escalonado (Ao = alcance; IDE = índice de dependência espacial) da CTC.

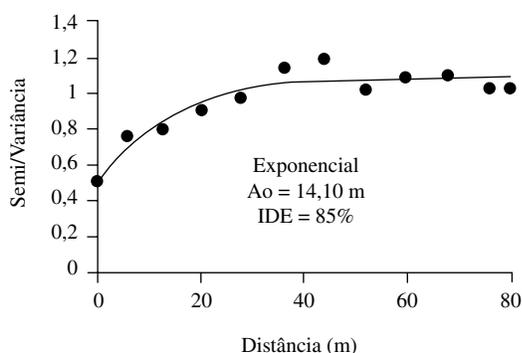


Figura 2. Semivariograma escalonado (Ao = alcance; IDE = índice de dependência espacial) de V%.

sejam consideradas independentes. O ajuste do modelo esférico para a CTC está de acordo com os resultados de pesquisas que indicam esse modelo como o de maior ocorrência para as variáveis do solo (Salviano *et al.*, 1998; Souza, 2001).

As variáveis apresentaram elevada dependência espacial ($IDE > 75\%$), conforme classificação de Zimback (2001).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os critérios de comparação do erro médio entre métodos de interpolação.

Tabela 1

Estadística descritiva e distribuição de frequência da CTC e V%, em latossolo vermelho amarelo sob cultivo de café.

Variáveis	Parâmetros Estatísticos								
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV(%)	s	Cs	Ck	w
CTC	7,87	7,70	4,70	11,80	17,48	1,38	0,20	-0,10	0,82 ^{ns}
V%	40,30	39,45	4,90	68,70	29,25	11,79	-0,02	0,28	0,84 ^{ns}

CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); s - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação; C_s - Coeficiente de simetria; C_k - coeficiente de curtose; ^{ns} distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilk’s (W) a 5% de probabilidade.

Tabela 2

Valores de erro médio para interpoladores usados na distribuição espacial da CTC e V%.

Interpoladores	Erro Médio	
	CTC	V%
KRIG	18,31	314,75
IDW	18,50	319,95

Os resultados obtidos para o critério de comparação do erro médio (Tabela 2) demonstram que os menores erros foram obtidos para KRIG, entretanto a diferença entre os métodos é pequena, principalmente para a variável CTC onde esta é mínima. A diferença é mais significativa para a variável V%, o que pode estar relacionado à escolha do modelo teórico do semivariograma, uma vez que esse pode influenciar a KRIG. Resultados semelhantes foram observados por Burrough (1986), que também não encontrou significativa diferença nos valores interpolados pelos métodos IDW e KRIG.

Trabalhando com estratos arbóreos, Kanegae Júnior, *et al.* (2006), observou que a krigagem reduziu os erros de estimativa em até 36%, sendo que o mesmo não foi observado pelo inverso do quadrado da distância, sendo a krigagem considerada como mais eficiente para o estudo em questão. Segundo esses mesmos autores, apesar do método IDW apresentar uma considerável eficiência, ele não garante que a eficiência seja mantida, caso uma nova amostragem seja realizada sobre os mesmos projetos, ao contrário da krigagem geoestatística.

Carvalho e Assad (2005), testando interpoladores para analisar o comportamento espacial da

precipitação no Estado de São Paulo, observaram que, para os dados em questão, o interpolador que apresentou resultado mais acurado, foi o de krigagem ordinária, sendo o inverso do quadrado da distância o mesmo indicado para este tipo de dados.

A krigagem ordinária, é um interpolador tido como ótimo, ou seja, a diferença dos valores estimados e os observados é nula (VIEIRA, 2000; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). A principal razão disso é que krigagem ordinária é um interpolador exato, passando exatamente pelo ponto observado, quando esse é usado no cálculo, contribuindo para sua maior precisão na estimativa quando comparada com outros métodos.

No entanto esse fenômeno não foi observado nesse estudo uma vez que as diferenças entre métodos foram irrisórias do ponto de vista de erro médio.

Pela comparação visual dos mapas obtidos, confirmam-se as pequenas diferenças entre os métodos de interpolação, principalmente para a CTC (Figura 3), onde ambos os mapas revelam um acréscimo significativo na direção y, ou seja, no sentido do declive do terreno.

Em ambos os mapas, gerados por diferentes interpoladores, observa-se maior concentração dos valores de CTC nas partes baixas da área, enquanto que os menores valores são observados nas porções superiores da mesma. A distribuição espacial da variável, determinada pelos interpoladores foi muito próxima.

No caso de V% (Figura 4), onde a diferença entre interpoladores foi maior, observa-se menor continuidade dos valores no mapa estimado por IDW em relação à KRIG. Tais resultados obtidos na comparação visual dos mapas podem estar

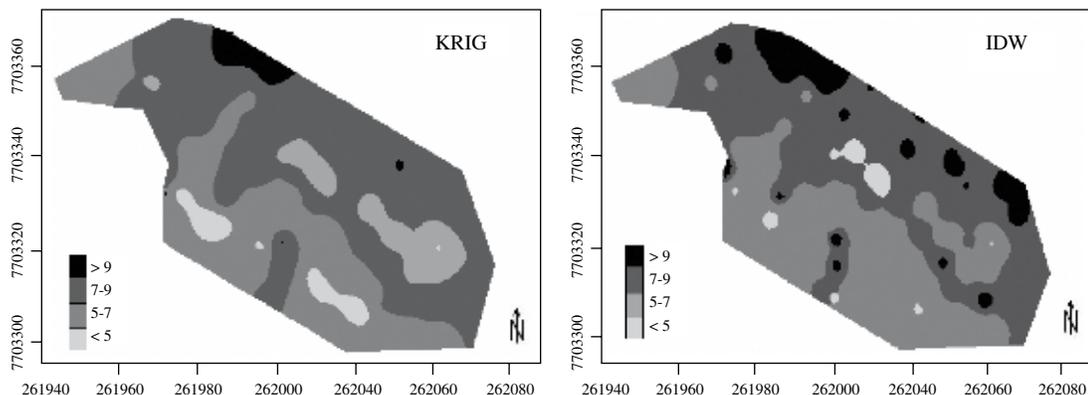


Figura 3. Mapas da variável CTC, interpolado por krigagem (KRIG) e inverso do quadrado da distância (IDW).

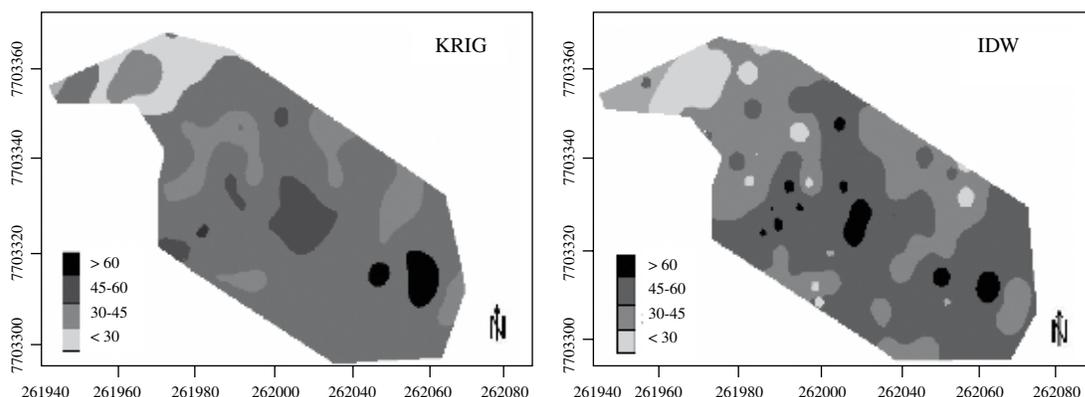


Figura 4. Mapas da variável V%, interpolado por krigagem (KRIG) e inverso do quadrado da distância (IDW).

relacionados ao fato de que KRIG é um estimador linear não-viciado que leva em consideração a estrutura de variabilidade encontrada para o atributo, enquanto que IDW é um interpolador univariado de médias ponderadas, que atribui aos pontos pesos fracionários, porém com soma igual a um.

Para tal variável observa-se que a maior proporção da área em estudo apresenta níveis entre 45-60% de saturação de base, com menores proporções para os níveis os demais níveis, quando analisado pelo mapa estimado por KRIG. No mapa estimado por IDW, observa-se que os valores de V% na classe de 30-45% de saturação ocupam uma proporção maior da área em detrimento aos valores na classe de 45-60%, que tem sua partição reduzida. Isso indica que a mesma semelhança observada para os interpoladores na variável CTC não foi constatada para V%, apesar do erro médio entre interpoladores, ser, também, próximo para essa variável.

CONCLUSÃO

Os atributos do solo estudados (CTC e V%) apresentaram alta dependência espacial, indicando que estimativas baseadas na média dos dados seria falha em representar a sua distribuição na área em estudo.

Os interpoladores apresentaram boa precisão para estimativa de valores em locais não amostrados para a variável CTC, com erros médios pequenos, no entanto para a variável V% esses erros médios foram altos.

O inverso do quadrado da distância (IDW) apresentou maior erro na estimação dos dados, entretanto sua diferença em relação à krigagem (KRIG) foi pequena, principalmente para a CTC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURROUGH, P. A. 1986. Principles of geographical information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press, 193 p.
- CARVALHO, J.R.P de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. 2002. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-9, ago.
- CRESSIE, N. 1991. Statistics for spatial data. New York: John Wiley, 900 p.
- CREUTIN, J.D. & OBLED, C. 1982. Objective analysis and mapping techniques for rainfalls fields: An objective comparison. *Water Res. Res.*, 18: 413-431.
- DIRKS, K.N.; HAY, J.E.; STOW, C.D. & HARRIS, D. 1998. Highresolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data. *J. Hydrol.*, 208: 187-193.
- EMBRAPA. 1997. Centro nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 212 p.
- FIETZ, C.R.; FABRICIO, A.C. & SALTON, J.C. 2000. Mapa de aplicação localizada de calcário em uma área experimental. In: BALASTREIRE, L.A. O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil. Piracicaba, ESALQ. p. 165-169.
- GOLDEN SOFTWARE. Surfer version 8.00 - Feb 11 2002. Surface mapping system. Colorado: Golden Software, Inc, 1993-2002. 1 CD-ROM.
- GOTWAY, C.A.; HARTFORD, A.H. 1996. Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the

- prediction of spatial variables. *J. Agric., Biol. Environ. Statist.*, 1: 17-39.
- ISAACS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. 1989.** *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 561 p.
- KANEGAE JUNIOR, H.; SCOLFORO, J.R.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA, A.D. 2006.** Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun.
- KRAVCHENKO, A.N. & BULLOCK, D.G. 1999.** A comparative study of interpretation methods for mapping properties. *Agron. J.*, 91: 393-400.
- LASLETT, G.M.; MCBRATNEY, A.B.; PAHL, P. & HUTCHINSON, M. 1987.** Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.*, 38: 325-341.
- MELLO, C. R.; LIMA, J.M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. 2003.** Krigagem e Inverso do Quadrado da Distancia para Interpolação dos Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas. *R. Bras. Ci. Solo*. V. 27, p. 925-933.
- ROBERTSON, G. P. GS+. 2000.** *Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User's Guide*. Plainwell, Gamma Desing Software, 152 p.
- TABIOS, G.Q. & SALAS, J.D. 1985.** A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Res. Bull.*, 21: 365-380.
- TIEPPO, R.C.; SOUZA, E.G.; URIBE OPAZO, M.A.; SILVEIRA, J.C.M. 2007.** Avaliação de diferentes interpoladores na geração de mapas temáticos da produtividade de soja em agricultura de precisão. In: IV Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão, Viçosa, 2007. *Anais... IV SIAP*. Viçosa, outubro.
- SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R. SPAROVEK, G. 1998.** Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 115-122.
- SOUZA, C.K. 2001.** Relação solo-paisagem-erosão e variabilidade espacial de latossolos em área sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal (SP). 2001. 186 f. *Dissertação* (Mestrado em Ciência do Solo)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.
- VIEIRA, S.R. 2000.** Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em ciência do solo*, Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 1, p. 1-54.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. 1980.** Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, p. 319-44.
- WARRICK; A.W.; ZHANG, R.; HARRIS, M.K. & MYERS, D.E. 1988.** Direct comparisons between kriging and other interpolation-Validation of flow and transport models for the unsaturated zone. New Mexico, p. 254-326.
- WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R.P. & CLAYTON, M.K. 1994.** Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *J. Prod. Agric.*, 7: 441-448.
- ZIMBACK, C.R.L. 2001.** Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu.