

GEOESTATÍSTICA APLICADA A AGRICULTURA DE PRECISÃO

*Sidney R. Vieira*¹

Resumo

Quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através de dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar a uma estatística relativamente nova: a geoestatística. Pôr estatística clássica entende-se aquela que utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenômeno, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias. Desse modo, estes dois ramos da estatística têm validade de aplicação em condições perfeitamente distintas. Para se determinar qual das duas deve ser usada em cada caso, utiliza-se o semivariograma o que expressa a dependência espacial entre as amostras. Havendo dependência espacial, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, através do método denominado krigagem. Além disso, muitas vezes, duas propriedades correlacionam-se entre si e no espaço, e uma é mais difícil ou mais cara para se medir no campo. A dependência espacial entre duas propriedades no espaço pode

¹ Eng. Agrônomo, M.S., Ph.D., Pesquisador Científico do Centro de Solos e Recursos Agroambientais, Instituto Agronômico, Caixa Postal 28, 13001-970, Campinas, SP. Email: sidney@cec.iac.br

ser expressa através do semivariograma cruzado, e se ele existir, o método chamado co-krigagem pode ser utilizado para estimar aquela mais difícil de se medir, utilizando-se dados de ambas. Estes métodos oferecem a escolha de se medir a propriedade mais difícil com um número mínimo possível. A construção de mapas de contornos (isolinhas), e o delineamento de espaçamento e disposição ótima de amostras no campo são outras aplicações imediatas.

Este trabalho enfoca os principais aspectos teóricos e práticos de geoestatística como ferramenta básica e com aplicação direta em estudos relacionados à agricultura de precisão.

INTRODUÇÃO

Idéia geral: Agricultura deve sempre almejar equilíbrio entre insumos aplicados e práticas agrícolas com atributos do solo e necessidades das plantas, considerando que estes últimos variam no espaço e em diferentes escalas. Por isso, ferramentas adequadas de análise e representação de dados espaciais devem ser utilizadas.

Variabilidade espacial de solos sempre existiu e deve ser considerada toda vez que a amostragem de campo for efetuada. Trabalhos sobre o assunto podem ser encontrados relatando estudos desta natureza desde o início deste século (Montgomery, 1913; Waynick, 1918; Harris, 1920), mas apenas recentemente surgiu uma ferramenta compreensível, chamada geoestatística (Matheron, 1971), própria para analisar a variabilidade espacial. O uso de geoestatística em análise de variabilidade espacial tem sido bem sucedido nos últimos 10 anos, como por exemplo, em ciência de solo (Vieira et al., 1981) e outras propriedades agronômicas (Vieira et al., 1983).

É de extrema importância que o modelo estatístico adotado na análise dos dados seja validado usando os dados

medidos, para garantir assim, que as ferramentas estatísticas adequadas e corretas sejam usadas. Por exemplo, a análise estatística clássica assume que os erros residuais são independentes e não correlacionados (Snedecor & Cochran, 1967). Com base nesta hipótese, experimentos de melhoramento genético de plantas, por exemplo, assumem que as respostas (por exemplo, produtividade) são exclusivamente resultantes do potencial genético das plantas. Entretanto, esta hipótese é raramente testada.

A geoestatística teve suas primeiras aplicações em mineração (Blais e Carlier, 1968; David, 1970; Ugarte, 1972; Journel, 1974; Olea, 1975, 1977), depois em hidrologia, (Delhomme, 1976). Já existem vários estudos em ciência do solo (Hajrasulih et al., 1980; Burgess & Webster, 1980a e 1980b; Webster & Burgess, 1980; Vieira et al., 1981; Vauclin et al., 1982; Vieira et al., 1983; Nielsen et al., 1983; Vieira et al., 1991; Vieira et al., 1992; Vieira & Lombardi Neto, 1995; Vieira et al., 1997; Paz Gonzalez & Vieira, 2000; Vieira, 2000) e em estudos de sensoriamento remoto (Vauclin et al., 1982; Vieira & Hatfield, 1984). Além disso, existem alguns livros tratando do assunto, dentre os quais destacam-se David (1977), Journel & Huijbregts (1978), Webster (1985), e Gooverts (1997). O principal objetivo deste trabalho é mostrar a utilidade de ferramentas da geoestatística para entender a variabilidade de propriedades do solo e do rendimento de grãos.

Descrevendo a variabilidade espacial de solos e atributos de plantas

Idéia geral: Na natureza, todas as variáveis são contínuas em alguma escala. Quando se efetua uma amostragem no campo, espera-se que, de alguma maneira, as medições tomadas representem aquela variável no domínio amostrado. Ferramentas apropriadas devem ser utilizadas para se certificar quão bem as amostragens representam a variável amostrada.

Definição do semivariograma: relacionamento entre um atributo e o espaço

Até o início dos anos 60, a maioria das análises de dados era feita sob a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória, para permitir o uso de métodos estatísticos como análise de variância e parâmetros como o coeficiente de variação (Harradine, 1949; Ball & Williams, 1968). Entretanto, este tipo de hipótese não pode simplesmente ser feito antes que se prove a não existência de correlação de amostras com distância. Se provada a correlação espacial, a hipótese de independência fracassa. Um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo, de amostras vizinhas é através da autocorrelação. Este método tem suas origens em análise de séries temporais e tem sido largamente usado em ciência do solo (Webster, 1973; Webster & Cuanalo, 1975; Vieira et al., 1981), principalmente para medições efetuadas em uma linha reta (transeto). A sua análise pode auxiliar na localização de divisas entre dois tipos de solos, ou na análise de periodicidade nos dados, através da análise espectral (Vauclin et al. 1982). Porém, quando as amostras forem coletadas nas duas dimensões do campo e interpolação entre locais medidos for necessária para a construção de mapas de isolinhas, será preciso usar uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial. Esta ferramenta é o semivariograma (Vieira et al., 1983).

O semivariograma é, por definição:

$$\gamma(h) = 1/2 E\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (1)$$

e pode ser estimado através de:

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

onde $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h (Journel & Huijbregts, 1978, pag. 12). O gráfico de $\hat{\gamma}(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , e

portanto depende de ambos, magnitude e direção de h . Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção de h ele é chamado isotrópico e representa uma situação bem mais simples do que quando é anisotrópico. Neste último caso, o semivariograma deve sofrer transformações antes de ser usado. É importante notar que, a maioria das variáveis de ciência do solo poderá ter um comportamento anisotrópico, isto é, mudar de maneira diferente para direções diferentes. É óbvio que isto depende muito da propriedade em estudo, das dimensões do campo de estudos, e do tipo de solo envolvido. Existem algumas maneiras de se transformar um semivariograma anisotrópico em isotrópico (Journel & Huijbregts, 1978, pag. 175; Burgess & Webster, 1980a). Em geral, a precisão da interpolação ou o tipo de hipótese satisfeita, não são afetados se, ao invés de se preocupar com escolha de método de transformação de anisotropia, apenas limitar a faixa de distância na qual se utiliza o semivariograma. De qualquer maneira é sempre aconselhável examinar semivariogramas para várias direções, antes de tomar decisões. As principais direções que devem ser examinadas são: 0° - na direção do eixo X, 90° - na direção do eixo Y, 45° e -45° - nas duas diagonais. O método "jack-knifing" é também de grande utilidade para se determinar a faixa de distância na qual o semivariograma pode ser, na prática, considerado isotrópico.

De qualquer maneira, sob isotropia ou não, a equação (2) é a que é usada para o cálculo do semivariograma. Os programas de computador utilizados para calcular o semivariograma simplesmente calculam aquela equação. Quando os dados forem coletados em transeto, o semivariograma é uni-direcional e nada pode ser dito a respeito de anisotropia, mas por outro lado, é uma preocupação a menos.

O gráfico das semivariâncias versus as distâncias correspondentes é o semivariograma. Este gráfico mostra valores discretos de pares de valores, porém, o semivariograma é usado de maneira contínua, e para tanto é necessário se fazer o ajuste de uma função matemática a estes dados. Existem alguns modelos que tem

características matemáticas que garantem que as variâncias calculadas sejam positivas. Os principais modelos que tem estas características são: esférico, exponencial e gaussiano (Vieira et al., 1983). Embora existam outros, estes 3 podem satisfazer a maioria das situações encontradas. Nas equações abaixo, C_0 , C_1 , e a simbolizam o efeito pepita, a micro variância e o alcance da dependência espacial.

Para o esférico, normalmente simbolizado $\text{Esf}(C_0, C_1, a)$ a equação é:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), \quad h \leq a \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, \quad h > a$$

Um semivariograma com este modelo está mostrado na figura 1a.

O modelo exponencial, simbolizado por $\text{Exp}(C_0, C_1, a)$ a equação é:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \text{EXP} \left(\frac{-3h}{a} \right) \right) \quad (4)$$

Um semivariograma com este modelo está mostrado na figura 1b.

O modelo gaussiano, simbolizado por $\text{Gau}(C_0, C_1, a)$ a equação é:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \text{EXP} \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right) \quad (5)$$

Um semivariograma com este modelo está mostrado na figura 1c.

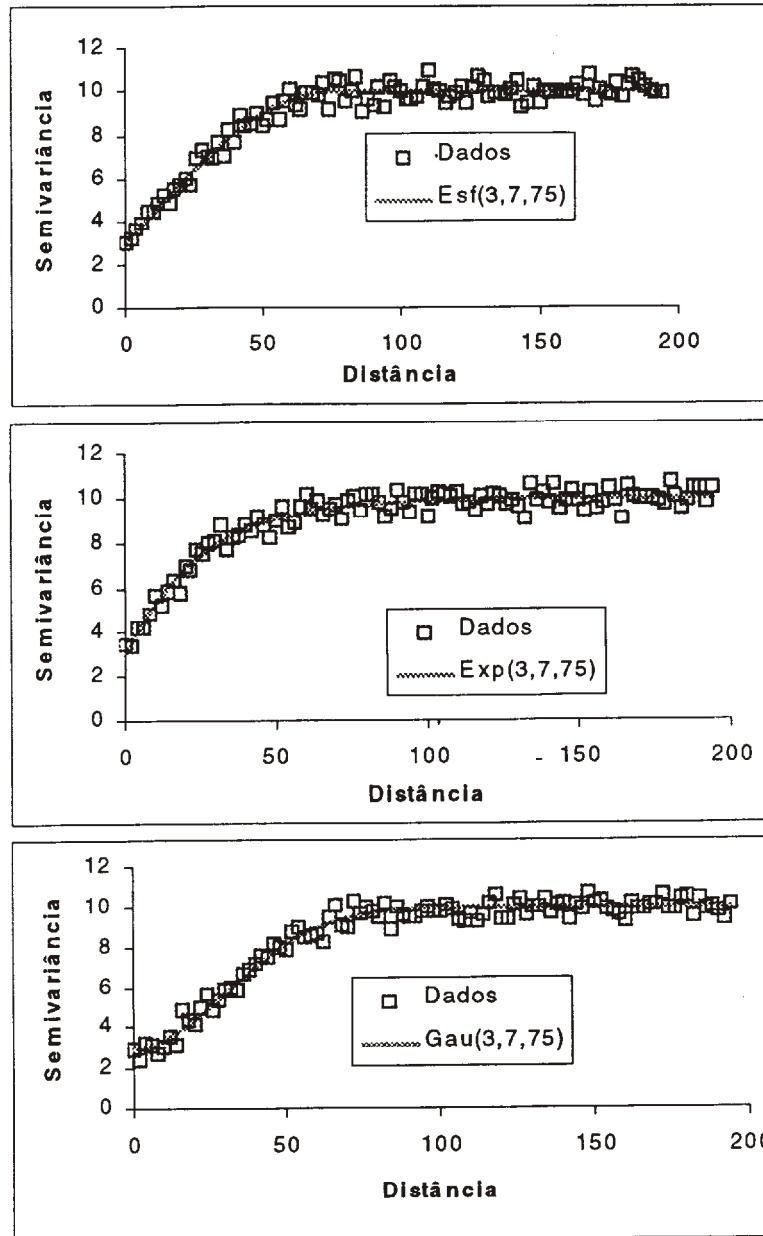


Figura 1a - Semivariograma com modelo esférico.

Figura 1b - Semivariograma com modelo exponencial.

Figura 1c - Semivariograma com modelo gaussiano.

- Definição do cross semivariograma: relacionamento entre dois atributos e o espaço

Freqüentemente algumas variáveis são relacionadas com outras, e pode-se utilizar esta vantagem. Exemplos comuns incluem condutividade hidráulica e retenção de água, as quais são difíceis e caras para se medir, e além disso são normalmente correlacionadas a variáveis mais fáceis de medir, como teores de partículas na camada superficial do solo. A facilidade de se utilizar de teores granulométricos em estimativas, tem atraído o interesse de pesquisadores que utilizam modelos para predição de rendimento de culturas, erosão e potencial de produção. Em situações em que a correlação espacial entre duas propriedades exista, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas no cross semivariograma método chamado co-krigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si.

Devido talvez, às maiores dificuldades envolvidas neste método do que com a krigagem em si, o número de trabalhos nesta área é bastante limitado (Vauclin et al, 1983; Vieira et al, 1983).

O semivariograma cruzado entre $Z_1(x_{1i})$ e $Z_2(x_{2i})$, igual ao semivariograma cruzado entre $Z_2(x_{2j})$ e $Z_1(x_{1j})$, é:

$$\gamma_{12}(h) = \gamma_{21} = 1/2 E \{ [Z_1(x_{1i} + h) - Z_1(x_{1i})][Z_2(x_{2j} + h) - Z_2(x_{2j})] \} \quad (6)$$

A equação (3), pode ser estimada por:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(x_{1i} + h) - Z_1(x_{1i})][Z_2(x_{2j} + h) - Z_2(x_{2j})] \quad (7)$$

onde $N(h)$ é o número de valores de Z_1 e Z_2 separados por um vetor h .

Comparando-se a equação (6) do semivariograma cruzado com a equação (2) do semivariograma, pode-se notar que o semivariograma é um caso particular do semivariograma cruzado, quando as duas variáveis são idênticas. Este fato,

aliado ao produto da diferença de duas variáveis faz com que fique bastante difícil de visualizar o que deve, intuitivamente, acontecer com $\gamma_{12}(h)$ quando h aumenta de zero (0) até à distância máxima. Considerando que h é um vetor e portanto possui magnitude e direção, é de se esperar que o semivariograma cruzado seja dependente de direção, podendo ser anisotrópico. Porém, se já é difícil interpretar anisotropia de semivariograma pôr causa do produto das diferenças, é pior ainda para o semivariograma cruzado.

Uma característica interessante da equação (6) é que, não importa que uma das variáveis tenha milhões de valores medidos, pois o semivariograma cruzado só será calculado usando as informações existentes para posições geográficas coincidentes. Isto significa que Z_1 e Z_2 tem que ser, necessariamente, definidos para os mesmos locais, e as informações excedentes deverão ser excluídas do cálculo. Assim, o programa de computador que for escrito para executar a equação (64), deverá, primeiramente, verificar se os dois conjuntos de dados são definidos para posições idênticas, para então calcular as diferenças.

Um semivariograma cruzado com características que podem ser identificadas como ideais, teria aparência do semivariograma mostrado na figura 1, porém, com significados diferentes, pelo simples fato de envolver o produto das diferenças de duas variáveis diferentes. Pôr exemplo, ao contrário do semivariograma, não é óbvio que o valor do semivariograma cruzado para $h=0$, deva ser nulo. Assim, além de espaços menores do que a distância de amostragem, acumulado no mesmo parâmetro, está a falta de correlação entre as duas variáveis. O alcance aqui representa apenas o final ou a distância máxima de dependência espacial entre as variáveis. Já o patamar do semivariograma cruzado, se existir, deve aproximar-se do valor da covariância entre as duas variáveis. Assim, quando as duas variáveis forem de correlação inversa, isto é, quando aumenta uma a outra diminui, a covariância será negativa e, conseqüentemente, o semivariograma cruzado será negativo.

Os modelos utilizados para o semivariograma cruzado são os mesmos já requeridos para o semivariograma.

TÉCNICAS PARA MAPEAR VARIABILIDADE ESPACIAL

Idéia geral: Na natureza, todas as variáveis são contínuas em alguma escala. Quando se efetua uma amostragem no campo, espera-se que, de alguma maneira, as medições tomadas representem aquela variável no domínio amostrado. Ferramentas apropriadas devem ser utilizadas para se certificar quão bem as amostragens representam a variável amostrada.

Krigagem.

A krigagem é uma técnica usada na geoestatística para estimar valores de propriedades para locais onde esta propriedade não foi medida. Para que esta ferramenta seja usada é necessário que exista a dependência espacial definida pelo semivariograma. Assim, a krigagem é um processo onde se estimam valores de propriedades espacialmente distribuídas, a partir de valores adjacentes interdependentes (VIEIRA et al., 1983). O valor estimado da propriedade é dado pela expressão:

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad [8]$$

onde N é o número de vizinhos medidos, $Z(x_i)$, utilizados na estimativa da propriedade e λ_i são os ponderadores aplicados a cada $Z(x_i)$, os quais são selecionados de forma que a estimativa obtida seja não tendenciosa. Isto implica em assumir duas condições :

$$E[Z^*(x_o) - Z(x_o)] = 0$$

$$\sigma_k^2(x_o) = E[Z^*(x_o) - Z(x_o)]^2 = \text{mínimo}$$

A estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem, possibilita estabelecer um mapa da área de estudo, para as propriedades do solo e atributos das culturas em estudos, permitindo a definição de linhas de isovalores, as quais podem ser de grande utilidade no planejamento experimental (SOUZA, 1992).

A técnica de validação conhecida como "Jack-knifing" permite avaliar a qualidade do método de estimativa de dados, e também, definir o melhor número de vizinhos mais próximos a um determinado ponto para a estimativa do valor neste ponto. "Jack-knifing" também ser utilizado para avaliar se o modelo do semivariograma experimental usado no processo de estimativa de dados é o que melhor se ajusta aos dados, buscando sempre atingir $M_E=0$ e $\sigma_k^2 = 1$ (VIEIRA et al., 1983). A técnica pode também ser utilizada em situações em que o semivariograma deixar dúvida entre uma fraca estrutura espacial ou em efeito pepita puro, para decidir qual destas duas opções deveria ser adotada.

Valores interpolados através de krigagem podem ser usados, juntamente com os valores medidos, para construir mapas tridimensionais ou de isolinhas das variáveis estudadas. A análise conjunta dos semivariogramas e mapas obtidos através de valores estimados pela krigagem permite avaliar o efeito de atividades realizadas na qualidade do solo e no rendimento das culturas. A análise conjunta dos mapas permiteá, entre outras aplicações, decidir sobre o efeito de algum fator na variabilidade espacial da produção das culturas. Poder-se também, comparar mapas para concluir sobre o efeito do estado atual da qualidade do solo avaliado na produção das culturas.

LITERATURA CONSULTADA

- BALL, D.F. & WILLIAMS, W.M. Variability of soil chemical properties in two uncultivated brown earths. *The Journal of Soil Science, Oxford*, 19: 379-391, 1968.

- BLAIS, R.A. & CARLIER, P.A. Applications of geostatistics in ore evaluation. In: CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, Ore reserve estimation and grade control, Montreal, 1968. p. 41-48. (Special Volume, 9)
- BURGESS, T.M. & WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. The Journal of Soil Science, Oxford, 31: 315-331, 1980a.
- BURGESS, T.M. & WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. The Journal of Soil Science, Oxford, 31: 333-341, 1980b.
- DAVID, M. Geostatistical ore reserve estimation. Amsterdam, Elsevier, 1977. 364p.
- DAVID, M. The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. In: PRIBAM MINING CONGRESS, Praga, 1970, Proceedings ..., Praga, 1970, 91-109.
- DELHOMME, J.P. Kriging in hydrosociology. Fontainebleau, Centre D'Informatique Geologique, 1976. 94p.
- HAJRASULIHA, S.; BANIABBASSI, J.; METTHEY, J. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran. Irrigation Science, Berlin, 1: 197-208, 1980.
- HARRADINE, F.F. The variability of soil properties in relation to stage of profile development. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 14: 302-311, 1949.
- HARRIS, J.A. Practical universality of field heterogeneity as a factor influencing plot yields. Journal Agr. Res., Washington, 19: 279-314, 1920.

- JOURNEL, A.G. Geostatistical for conditional simulation of orebodies. *Economic Geology*, Lancaster, 79(5):673-687, 1974.
- JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, Ch.J. *Mining geostatistics*. London, Academic Press, 1978, 600p.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, Lancaster, 58: 1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its application. *Les Cahiers du centre de Morphologie Mathematique*, Fas. 5, C. G. Fontainebleau. 1971.
- MONTGOMERY, E.G. Experiments in wheat breeding: experimental error in the nursery and variation in nitrogen and yield. Washington, U.S. Dept. Agric., 1913. 61p. (Bur. Plant Indust. Bul., 269).
- NIELSEN, D.R.; TILLOTSON, P.M. & VIEIRA, S.R. Analysing field-measured soil-water properties. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, 6: 93-109, 1983.
- OLEA, R.A. Measuring spatial dependence with semivariograms. Lawrence, Kansas, University of Kansas, Kansas Geol. Survey, 1977. 153p. (Series on Spatial Analysis, 3)
- OLEA, R.A. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Lawrence, Kansas, Kansas Geol. Survey, University of Kansas, 1975. 137p. (Series on Spatial Analysis, 2)
- PENDLETON, R.L. Are soils mapped under a given type name by the Bureau of Soils method closely similar to one another? *Agricultural Sciences*, Davis, 3:369-498, 1919.

- ROBINSON, G.W. & LLOYD, W.E. On the probable error of sampling in soil surveys. *The Journal*
- SMITH, L.H. Plot arrangement for variety experiment with corn. *Proc. Amer. Soc. Agron., Madison, V. I. 1907/09*, p. 84-89, 1910.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 6. ed., Ames, Iowa State University Press, 1967. 593 p.
- UGARTE, A. Ejemplos de modelos de estimacion a corto e largo plans. *Boletin de Geostatistica, s.l.p.*, 4:3-22, 1972.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; BERNARD, R. & HATFIELD, J.L. Spatial variability of two transects of a bare soil. *Water Resources Research, Washington*, 18: 1677-1686, 1982.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, G. & NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited field observations. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, 47: 175-184, 1983.
- VIEIRA, S.R. & HATFIELD, J.L. Temporal variability of air temperature and remotely sensed surface temperature for bare soil. *International Journal of Remote Sensing, Basingstole*, 5: 587-596, 1984.
- VIEIRA, S.R.; D.R. NIELSEN and J.W. BIGGAR. 1981. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J, Madison*, 45:1040-1048, 1981.
- VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. de; DECHEN, S.C.F. & LOMBARDI NETO, F. Utilização de análise de Fourier no estudo do efeito residual da adubação em uva, na crotalária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, 11:7-10, 1987.

- VIEIRA, S.R.; DE MARIA, I.C.; LOMBARDI NETO, F.; DECHEN, S.C.F. & CASTRO, O.M. de. Caracterização da variabilidade espacial de propriedades físicas. In: Lombardi Neto, F. & Camargo, O.A. de. Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP)., Campinas, Instituto Agrônômico, 1992. p. 41-51. (Documentos IAC, 29)
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, T.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 51: 1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R.; J.L. HATFIELD; D.R. NIELSEN and J.W: BIGGAR. 1983. Geoestatical theory and aplication to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51(3):1-75.
- 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*, Campinas, 15(1): 93-98, 1991.
- VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. & BURROWS, I.T. Mapeamento da chuva máxima provável para o Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 15: 93-98, 1991.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 45: 1040-1048, 1981.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. & TILLOTSON, P.M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 21:525-533, 1997.
- VIEIRA, S.R.; REYNOLDS, W.D. & TOPP, G.C. Spatial variability of hydraulic properties in a highly structured clay

soil. In: WIERANGA, P.J. and BACHELET, D., eds. Validation of Flow and Transport Models for the Unsaturated Zone: Conference Proceedings. Las Cruces, NM, Department of Agronomy and Horticulture, New Mexico State University, 1988. p.471-483. (Research Report 88-SS-04)(CONFERENCE OF VALIDATION OF FLOW AND TRANSPORT MODELS FOR THE UNSATURATED ZONE, Ruidoso, Novo México, 1988).

WAYNICK, D.D. Variability in soils and its significance to past and future soil investigations. I. Statistical study of nitrification in soils. *Agricultural Sciences, Davis*, 3: 243-270, 1918.

WAYNICK, D.D. & SHARP, L.T. Variability in soils and its significance to past and future soil investigations. II. Variation in nitrogen and carbon in field soils and their relation to the accuracy of field trials. *Agricultural Sciences, Davis*, 4: 121-139, 1919.

WEBSTER, R. Automatic soil boundary location for transect data. *Mathematical Geology, New York*, 5: 27-37, 1973.

WEBSTER, R. & BURGESS, T.M. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. *The Journal of Soil Science, Oxford*, 31: 505-524, 1980.

WEBSTER, R. & CUANALO, H.E. de la C. Soil transects correlograms of north Oxfordshire and their interpretation. *The Journal of Soil Science, Oxford*, 26: 176-194, 1975.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.