

## MODELO DE CORRELAÇÃO ESPACIAL GAUSSIANA PARA CANA-DE-AÇÚCAR EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DO SOLO

Grego<sup>1</sup>, C. R., Grego<sup>2</sup>, S., Rodrigues<sup>3</sup>, C. A. G., Vaz<sup>4</sup>, C. M. P., Hurtado<sup>5</sup>, S. M. C.

<sup>1</sup> Pesquisadora Doutora da Embrapa Monitoramento por Satélite, celia.grego@embrapa.br

<sup>2</sup> Doutoranda em Estatística, ESALQ/USP, simone.grego@usp.br

<sup>3</sup> Pesquisadora Doutora da Embrapa Monitoramento por Satélite, cristina.rodrigues@embrapa.br

<sup>4</sup> Pesquisador Doutor da Embrapa Instrumentação, carlos.vaz@embrapa.br

<sup>5</sup> DuPont-Divisão Pioneer Sementes, sandroelbat@gmail.com

**Resumo** – A análise geoestatística é utilizada principalmente para acomodar padrões espaciais em adição aos efeitos das covariáveis atributos do solo. O objetivo deste trabalho foi utilizar a análise geoestatística para quantificar o grau de dependência espacial do número de colmos da cana-de-açúcar em relação à correlação dos atributos do solo em Mogi Mirim, SP. Foram determinadas a densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ), umidade ( $\text{g g}^{-1}$ ) do solo, nas profundidades de 15cm e de 30cm, a resistência de penetração em MPa (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 cm) e a quantidade de colmos da cana-de-açúcar por  $\text{m}^2$  nos 90 pontos de amostragem georreferenciados. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e métodos de geoestatística utilizando a função de correlação gaussiana entre as covariáveis do solo e a variável quantidade de colmos. Verificou-se a existência de variabilidade espacial para a variável quantidade de colmos e o padrão espacial foi suavizado devido a normalização considerando as covariáveis significativas (densidade do solo 0-15cm, densidade do solo 15-30cm e resistência à penetração 20-30cm), as quais foram utilizadas no modelo geoestatístico gaussiano.

**Palavras-chave:** covariáveis; geoestatística; variabilidade espacial.

## SPACE CORRELATION GAUSSIAN MODEL FOR SUGAR CANE IN RESPECT TO SOIL ATTRIBUTES

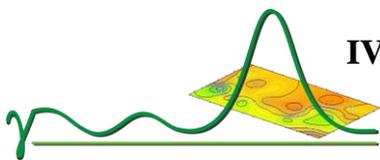
**Abstract:** Geostatistical analysis was used to accommodate spatial patterns in addition to the effects of soil attributes covariates. The objective of this study was to use the geostatistical analysis to quantify the spatial dependence of the number of stalks sugar cane in relation to the correlation of soil properties in Mogi Mirim, SP. We determined the density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), soil moisture ( $\text{g g}^{-3}$ ) at depths of 0-15cm and 0-30cm the penetration resistance in MPa (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 cm) and the amount of sugarcane stalks per  $\text{m}^2$  in 90 points of georeferenced sampling. The data was submitted to descriptive statistical analysis and geostatistical methods using Gaussian correlation function between soil covariates and the variable amount of stems. It was verified the existence of spatial variability for the variable amount of stem and the spatial pattern was understated due to standardization considering the significant covariates (soil density 0-15cm, soil density 15-30cm and penetration resistance 20-30cm) which were used in the geostatistical gaussian model.

**Keywords:** covariates; geostatistics; spatial variability.

### Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), cultura de grande importância econômica no Brasil por fornecer a matéria prima para a produção de açúcar e álcool, exige cada vez mais a adoção de tecnologias como a agricultura de precisão e técnicas conservacionistas do solo. Com o crescimento e abertura de novas usinas no Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, o investimento da agricultura de precisão na cultura tem se tornado maior (BALASTREIRE, 1998). Estas técnicas visam à melhoria das características químicas e físicas do solo e consequentemente aumento da produtividade da cultura, podendo representar uma agricultura sustentável do ponto de vista econômico e ambiental.

Um aspecto importante para a melhoria da produtividade das culturas é o gerenciamento da variabilidade espacial dos fatores relacionados, como os fatores de solo. A variabilidade espacial do solo analisada pela geoestatística é um método reconhecido e consolidado (WARRICK e NIELSEN, 1980; VIEIRA et al., 1983; GOOVAERTS, 1999; SOARES, 2006), que permite identificar locais que necessitam de manejo diferenciado possibilitando mapear os atributos do solo e determinar as correlações entre estes atributos e a produtividade da cultura.

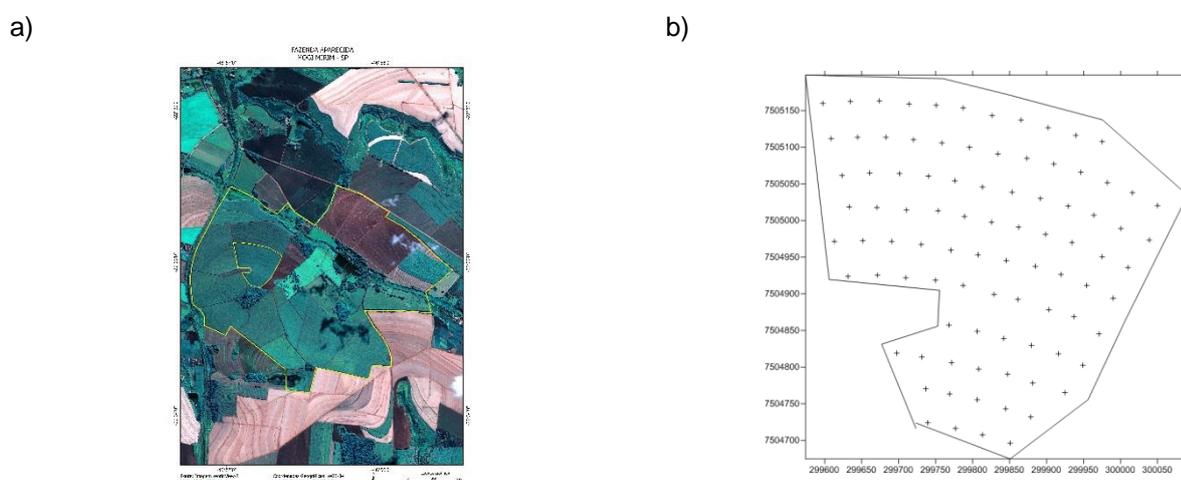


Tradicionalmente são espacializados atributos individualmente para montagem de plataformas de informações espaciais que indicaram algum padrão de áreas semelhantes que possam receber o manejo localizado. No entanto esta análise impossibilita mensurar a precisão dos resultados combinados de vários atributos do solo. A análise de correlação espacial entre covariáveis pode ser aplicada, quando se tem uma série de informações auxiliares que podem ser utilizadas em conjunto por serem correlacionadas com uma informação principal e relevante para indicar, por exemplo, a produtividade da cultura.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é utilizar a ferramenta geoestatística gaussiana para estudar a variabilidade espacial para a quantidade de colmos de cana-de-açúcar em relação aos atributos de solo fortemente correlacionados.

## Material e Métodos

A área estudada pertence à Fazenda Aparecida, localizada no município de Mogi Mirim, SP, cultivada com cana-de-açúcar, numa área de 17,8 ha com solo do tipo Nitossolo, textura argilosa. As amostras foram coletadas em 90 pontos georreferenciados, nos meses de abril a junho de 2012. A Figura 1 mostra a imagem de satélite e a grade de amostragem da área estudada.



**Figura 1:** Área de amostragem: a) imagem WorldView-2 do dia 30 de abril de 2011 da fazenda Aparecida, Mogi Mirim, SP; b) 90 pontos georreferenciados de coleta de amostras de campo.

Foi realizada uma amostragem pelo método do anel volumétrico para a densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ), umidade ( $\text{g g}^{-1}$ ) do solo nas profundidades de 15cm e de 30cm conforme o método de Camargo et al. (1986). Para a resistência do solo à penetração foi utilizado o penetrômetro de impacto segundo metodologia de Stolf (1991) e obtido os valores em MPa de 0 a 60 cm de profundidade divididos de 10 em 10 cm.

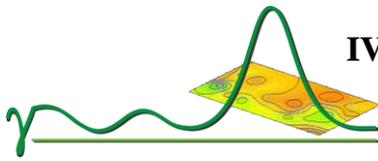
Como estimativa da produtividade da cana-de-açúcar houve a quantificação do número de colmos por ponto de amostragem ( $\text{colmos m}^{-2}$ ), considerando o número de colmos em três linhas de cana-de-açúcar de 10 metros de comprimento.

Primeiramente foi realizada a estatística descritiva dos dados e uma análise de correlação entre o número de colmos e os dados dos atributos do solo. Neste estudo, existe a presença de covariáveis atributos do solo e a necessidade de verificar a transformação para normalidade dos dados. A hipótese de normalidade dos resíduos foi testada por meio da família de transformação Box-Cox. Quando os dados não seguem uma distribuição normal, é calculada uma estimativa do parâmetro ( $\lambda$ ) para estabelecer uma distribuição normal, pois é um requisito para análise de regressão. O parâmetro ( $\lambda$ ) maximiza a função de verossimilhança. A relação entre os dados originais  $Y$  e os dados transformados é expressa pela equação a seguir:

$$Y^* = \begin{cases} \frac{Y^\lambda - 1}{\lambda} & , \text{se } \lambda \neq 0 \\ \log Y & , \text{se } \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

em que  $\lambda$  é o parâmetro da transformação e  $Y^*$  é a variável resposta.

A análise de correlação das covariáveis de solo em relação ao número de colmos foi realizada pelo cálculo da estimativa dos parâmetros, erro padrão e o valor p das covariáveis do modelo geoestatístico com a função de correlação gaussiana para variável número de colmos. As covariáveis correlacionadas significativamente pelo teste de T-Student a 5% de probabilidade, foram utilizadas para a análise de dependência espacial da variável número de colmos com adição aos efeitos das covariáveis significativas dos atributos do solo.



A dependência espacial foi analisada por meio de ajuste de semivariograma utilizando do software R Development Core (TEAM, 2008), considerando a pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca para o cálculo do semivariograma estimada na equação (2) dada por:

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

em que  $N(h)$  é o número de pares dos valores medidos  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ , separados por uma distância  $h$ . Segundo Vieira (2000), as observações vizinhas são mais parecidas entre si do que aquelas separadas por distâncias maiores, isto é, aumentando  $\hat{\gamma}(h)$  com uma distância  $h$  até algum valor máximo, em que se estabiliza em um patamar que corresponde à distância limite de dependência espacial, que é o alcance. As medições que se localizam a uma distância maior que o alcance tem distribuição aleatória, esta é uma razão de que as observações sejam independentes.

Para o modelo geoestatístico gaussiano utilizado, assumiu-se que as observações  $y_i = y_1, \dots, y_n$  seguem o modelo linear Gaussiano (NESI, 2013), em que é descrita a seguir:

$$y_i = D\beta + S(x_i) + e_i \quad (3)$$

em que  $y_i$  é uma variável aleatória observada na posição espacial  $x_i$ ,  $D$  uma matriz  $n \times p$  de covariáveis,  $\beta$  corresponde vetor de parâmetros da regressão e  $S(x_i)$  denota o processo estacionário gaussiano latente na posição  $x_i$ , com média zero, variância  $\sigma^2$  e função de correlação  $\rho(u; \phi, k)$ . Com argumento dado pela distância  $u$  de separação entre observações e parametrizada por  $\phi$ , que descreve o grau de associação espacial e o parâmetro de suavidade da função de correlação  $k$ .

Analisando a dependência espacial pelo semivariograma, foram ajustados às funções de correlação esférica, gaussiana, matern e exponencial, para a escolha do "melhor" modelo. Para a validação do melhor ajuste optou-se pela Informação de Akaike (AIC).

Com o semivariograma verifica-se a existência do padrão espacial, ou seja, se as observações vizinhas são semelhantes há possibilidade de estimar valores para qualquer local, onde a variável não foi medida. Para isso usa-se a krigagem, que segundo Vieira (2000) tem como definição estimar valores com condições de estimativa sem tendenciosidade e com desvios mínimos em relação às observações conhecidas. A partir dos valores estimados constrói-se isolinhas em função das coordenadas geográficas, assim são construídos mapas de isolinhas.

## Resultados e Discussão

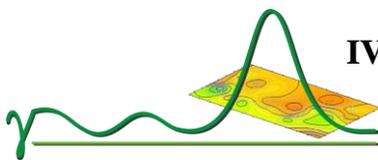
Na tabela 1 são verificados os resultados da estatística descritiva para os dados analisados. Na média o solo possui densidade e resistência à penetração maior em profundidade do que na superfície. Este resultado pode ser devido ao sistema de preparo adotado ser o plantio direto em que o não revolvimento do solo pode adensar camadas mais profundas do solo, estando de acordo com os resultados encontrados por Sousa et al (2006) e também por ser um solo classificado como muito argiloso, Nitossolo. Os coeficientes de variação (CV) foram na maioria baixos a médios, com exceção da resistência à penetração de 10-20cm que apresentou CV alto segundo a classificação de Gomes (2000).

**Tabela 1.** Estatística descritiva para a densidade (D) e umidade do solo (U) de 0-15 e de 15-30 cm, Resistência à penetração (RP) de 0-60 cm de profundidade divididos de 10 em 10 cm e para o número de colmos de cana-de-açúcar, e análise de correlação ( $r^2$ ) entre o número de colmos e os atributos físicos do solo.

Estatística descritiva	D15 (gcm <sup>-3</sup> )	U15 (gg <sup>-1</sup> )	D30 (gcm <sup>-3</sup> )	U30 (gg <sup>-1</sup> )	RP 0-10cm (MPa)	RP 10-20cm (MPa)	RP 20-30cm (MPa)	RP 30-40cm (MPa)	RP 40-50cm (MPa)	RP 50-60cm (MPa)	Colmo (m <sup>-2</sup> )
Média	1,24	0,27	1,30	0,27	0,84	1,64	2,65	2,72	2,39	2,12	2,07
Mínimo	1,11	0,22	1,19	0,23	0,56	0,65	1,40	1,81	1,56	1,31	1,61
Máximo	1,38	0,30	1,43	0,30	1,31	3,14	4,56	4,23	4,06	3,48	2,36
CV*	4,71	5,04	3,90	4,04	19,34	33,78	22,80	17,73	20,99	19,56	7,14
Desvio padrão	0,06	0,01	0,05	0,01	0,16	0,55	0,60	0,48	0,50	0,41	0,15
Variância	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,31	0,36	0,23	0,25	0,17	0,02
Curtose	-0,56	2,06	-0,19	1,62	-0,21	0,20	0,38	0,25	0,91	0,35	0,31
Assimetria	-0,12	-0,24	-0,22	0,11	0,47	0,78	0,65	0,63	0,90	0,72	-0,47
<b>Correlação</b>											
Número de colmos	-0,135	0,108	-0,107	0,247	-0,156	-0,213	-0,060	-0,204	-0,308	-0,233	1,000

\*CV = Coeficiente de variação

De acordo com os valores de assimetria e curtose distantes de zero, observou-se que as variáveis umidade 0-15 e de 15-30cm, resistência à penetração de 10-20, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm não seguiam distribuição normal, com isso foi necessária a transformação dos dados, pois para a análise de regressão requer que os resíduos sejam normalizados, por meio da aplicação da família de transformação Box-Cox (BOX; COX, 1964).



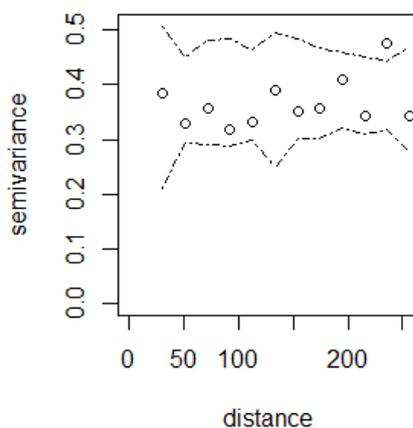
A análise de correlação da Tabela 1, permite inferir que houve correlação fraca entre o número de colmos e os atributos do solo, sendo na maioria correlação negativa, com exceção da umidade do solo de 0-30 cm. Isto indica que o número de colmos é menor quando o solo está com maior densidade do solo e maior resistência do solo à penetração. Apesar de não terem avaliado o número de colmos, Souza et al. (2014) identificaram que o aumento dos níveis de compactação do solo de 1,65 para 1,82 kg dm<sup>-3</sup> proporcionou aumento no comprimento do colmo da cana-de-açúcar, ou seja o solo mais compactado pode também provocar um estiolamento nos colmos da cana-de-açúcar.

Mesmo com fraca correlação negativa entre número de colmos e os atributos do solo, conforme verificada, foi realizada a análise das covariáveis de solo em função do modelo de correlação gaussiana para a variável número de colmos. Foram consideradas as covariáveis de solo correlacionadas significativamente pelo teste T- Student ao nível de 5% de probabilidade, conforme tabela 2.

**Tabela 2.** Estimativas dos parâmetros, erro padrão e o valor p das covariáveis do solo (densidade (D) e umidade do solo (U) de 0-15 e de 15-30 cm, Resistência à penetração (RP) de 0-60 cm de profundidade divididos de 10 em 10 cm) com a função de correlação gaussiana para variável número de colmos.

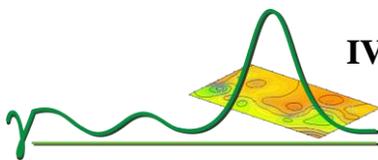
Covariáveis	Estimativa	Erro padrão	Valor p
Intercepto	2,55	2,23	0,13
D 0-15 (gcm <sup>-3</sup> )	4,39	1,88	0,01*
U 0-15 (gg <sup>-3</sup> )	-8,59	7,12	0,11
D 15-30 (gcm <sup>-3</sup> )	-3,71	2,18	0,04*
U 15-30 (gg <sup>-3</sup> )	6,38	7,45	0,20*
RP 0-10 (MPa)	-0,07	0,16	0,33
RP 10-20 (MPa)	-0,08	0,07	0,12
RP 20-30 (MPa)	0,09	0,06	0,05*
RP 30-40 (MPa)	-0,04	0,09	0,31
RP 40-50 (MPa)	-0,06	0,10	0,28
RP 50-60 (MPa)	0,10	0,09	0,12

Observando a tabela 2 tem-se que as covariáveis correlacionadas com o número de colmos significativas a 5% foram densidade do solo 0-15cm, densidade do solo 15-30cm e resistência à penetração 20-30cm. Isto indica que a densidade do solo interfere espacialmente na quantidade de colmos das plantas. A análise do variograma detectou, graficamente, a existência de dependência espacial da variável número de colmos quando adicionado os efeitos das covariáveis do solo correlacionadas significativamente. Observou-se a existência de pontos fora dos envelopes simulados, o que indica dependência espacial dos dados (Figura 2).



**Figura 2:** Variograma empírico e envelope simulado para verificação de dependência espacial do número de colmos em relação ao atributos do solo correlacionados.

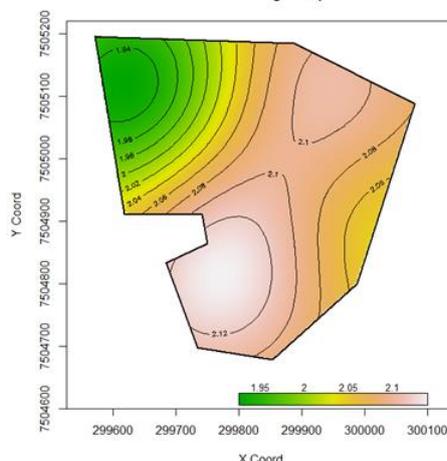
Para o ajuste do variograma, foram testados os modelos gaussiano, esférico, matérn e exponencial. A função escolhida foi a gaussiana por obter o menor valor de Akaike (AIC) conforme Tabela 3.



**Tabela 3.** Valores de Akaike (AIC) obtidos dos modelos espaciais.

Função de correlação	Número de parâmetros	AIC
Gaussiano	14	-82,87
Esférico	14	-80,43
Matérn	14	-72,45
Exponencial	14	-80,43

Em seguida construiu-se o mapa da variável número de colmos com a função de correlação gaussiana com a adição das covariáveis densidade do solo 0-15cm, densidade do solo 15-30cm e resistência à penetração 20-30cm (Figura 4). Observa-se que o número de colmos com o efeito do solo, apresenta um padrão espacial bem definido com mancha de menores valores na parte superior esquerda do mapa, pois a análise do modelo de correlação gaussiana tende a suavizar o mapa.



**Figura 3:** Padrão espacial da variável número de colmos com adição aos efeitos das covariáveis densidade do solo 0-15, densidade do solo 15-30 e resistência à penetração 20-30.

A análise geoestatística dos dados com o modelo de correlação gaussiana permitiu o entendimento da variabilidade espacial da variável número de colmos, que mais se aproxima da produtividade da cana-de-açúcar, considerando os efeitos físicos do solo, o que permite auxiliar nas plataformas de informação para as tomadas de decisões.

### Conclusão

A densidade do solo e resistência do solo à penetração foram maiores em profundidade do que na superfície. A correlação entre o número de colmos e a maioria dos atributos do solo foi negativa, indicando que o número de colmos é menor quando o solo está com maior densidade do solo e maior resistência do solo à penetração.

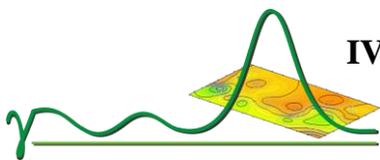
A função de correlação do modelo geoestatístico gaussiano determinou as covariáveis significativas densidade do solo de 0-15 e de 0-30 cm e resistência à penetração de 20-30cm, o que indicou quais atributos do solo modificam e influenciam nas características do número de colmos espacialmente.

### Referências

BALASTREIRE, L.A. Potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. **STAB**. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v.16, n.4, p.22-26, 1998.

BOX G.E.P; COX D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Society**, v. 26, p. 211-252, 1964.

CAMARGO, O. A., MONIZ, A C., JORGE, L.A, VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 93p. (Boletim Técnico, 106).



## IV Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias

14 e 15 de Maio de 2015

Botucatu, São Paulo

- GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 14.ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 477p.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476p.
- NESI, C. N.; RIBEIRO, A.; BONAT, W. H.; RIBEIRO JR, P. J. Verossimilhança na seleção de modelos para predição espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, mar/abr, 2013.
- TEAM, R Development Core. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria, 2008. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 20 out. 2014.
- SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Portugal. Lisboa: IST Press. Instituto Superior Técnico, 2006, 214p.
- SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; JUNIOR, J. M.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v.36, p.128-134, 2006.
- SOUSA, C. C. M.; PEDROSA, E. M. R; MARIO M. R.; EREIRA FILHO, J. V.; SOUZA, M. A. L. M. Influência da densidade do solo infestado por nematoide no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar. **Rev. bras. eng. agríc. ambient**, Campina Grande –PB, v.18, p. 475–479, 2014.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.2, p.229-35, 1991.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds). Tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 1, p. 1-53, 2000.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 51, n. 1, p. 1-75, 1983.
- 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. 350p.