

Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro

Marcio Lustosa Santos, Morel de Passos e Carvalho*, Rosalina Maria Alves Rapassi, Cid Tacaoca Muraishi, Adriano Maller e Flávia Araújo Matos

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Avenida Brasil, 56, Cx. Postal 31, 15385-000, Centro, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: mpcarva53@yahoo.com.br

RESUMO. A produtividade vegetal depende de vários fatores, dentre eles a densidade e a porosidade do solo. No ano agrícola 2004/2005, na Fazenda Experimental de Ensino e Pesquisa da Faculdade de Engenharia (Unesp), Campus de Ilha Solteira, Estado de São Paulo (22°23' latitude S; 51°27' longitude W), foram analisados a produtividade de grãos de milho (PG), irrigado com pivô central, as densidades da partícula (DP) e do solo (DS) e a porosidade total (PT) de um Latossolo Vermelho Distroférico, sob plantio direto. O objetivo foi estudar as correlações lineares e espaciais entre os atributos. Foi instalada uma rede geoestatística, para a coleta dos dados do solo e da planta, contendo 120 pontos amostrais, numa área de 0,8 ha. Os atributos do solo apresentaram baixa variabilidade de seus dados, sendo média no da planta. A DS e a PT, na camada superficial, e a PG não variaram aleatoriamente. Elas seguiram padrões espaciais bem definidos, com alcances entre 28,6 e 60,6 m. As correlações lineares múltiplas indicaram que a PT1, a PT3 e a DS3 foram atributos significativos, quando correlacionados com a PG. Entre os atributos do solo, as correlações lineares simples variaram elasticamente. Contudo, quando correlacionados com a PG, tais correlações pouco variaram. Ainda que com reservas devido à baixa correlação, com o aumento da DS3 ocorreu uma diminuição da PG. Por outro lado, as correlações espaciais entre os atributos do solo e a PG foram praticamente nulas, sendo, contudo, elevadas quando exclusivamente entre aqueles do solo.

Palavras-chave: manejo do solo, propriedades físicas do solo, solos tropicais, cultura do milho, semeadura direta, geoestatística.

ABSTRACT. Linear and spatial correlation between corn grains productivity (*Zea mays* L.) and physical attributes in a Haplic Acrustox under no-tillage in the Brazilian Savannah. The vegetal productivity depends on several factors, including the bulk density and the soil porosity. The corn grains yield (GY), under no-tillage system and irrigated, and the following soil attributes (particle density-PD, bulk density-BD, and the total porosity-TP), in a Dystroferic Red Latosol (Haplic Acrustox), located at the Experimental Station of the Faculdade de Agronomia (Unesp), in Ilha Solteira, Sao Paulo State, Brazil (22°23' latitude S; 51°27' longitude W), were analyzed in the crop year 2004/2005. The aim was to study the linear and spatial correlations among the attributes. A geostatistical grid to collect soil and plant data was installed with one hundred and twenty sample points, in an area of 0.8 ha. The soil attributes showed low variability of their data, although it showed to be on average at the GY. The BD and TP, in the soil surface, did not change randomly. They showed an excellent spatial performance, with ranges between 28.6 and 60.6 m. The multiple linear correlations showed that the TP1, TP3, and BD3 were significant attributes when they correlated with the GY. Among the soil attributes, the simple linear correlations were very elastic. Thus, when in correlations with the GY they showed little variability. With reservation due to low correlation, with the increase of the BD3 the GY decreased. Differently, the spatial correlations among the soil attributes and the GY were practically nulls. However, they were high when exclusively among every all the other attributes of the soil.

Key words: soil management, soil physical properties, tropical soils, corn crop, no-tillage, geostatistic.

Introdução

Do ponto de vista físico-químico coloidal, o solo é um sistema trifásico disperso. Com base no volume, agronomicamente é considerado ideal quando apresentar $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de porosidade total, responsável

pela aeração e fornecimento de água às plantas, e $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de volumes de sólidos (Baver *et al.*, 1973; Kiehl, 1979). A existência das fases sólida, líquida e gasosa do solo, no qual os processos de adição, perda, transformação e transporte ocorrem intermitentemente desde o início de sua gênese,

obedecendo às variações inerentes aos fatores de formação, contribuem para conferir-lhe heterogeneidade (Smeck *et al.*, 1983). É universalmente aceito que o uso e o manejo do solo, especialmente com relação ao desmatamento, a rotação de cultura e a adubação, com o passar do tempo, conduzem-no ao aumento de sua heterogeneidade (Souza, 1992).

A produtividade das plantas depende de vários fatores, dentre eles da densidade do solo e de sua granulometria. Além de outros aspectos do solo, o conhecimento de sua porosidade total é tão importante quanto o entendimento do significado da dimensão das suas partículas primárias (areia, silte e argila) e, de certa forma, ambos são importantes para o estudo do aumento da produtividade agrícola de cereais (Konopatzki, 2003).

Cunha *et al.* (2002) estudaram os efeitos de três preparos do solo utilizando arado de aiveca, grade aradora e plantio direto, sobre a variabilidade da produtividade de grãos de milho e do feijoeiro sob um Latossolo Vermelho perférrico textura argilosa. A produtividade das culturas foi avaliada numa rede geostatística quadrada de 49 pontos, espaçados de 4 x 4 m. Os tratamentos de preparo do solo influenciaram a produtividade de grãos das culturas do milho e do feijão. Para o milho, a maior produtividade ocorreu no tratamento com o arado de aiveca, enquanto que para o feijão nos tratamentos com o plantio direto e com a grade aradora. A produtividade de grãos de milho apresentou menores coeficientes de variação do que a do feijão. Conseqüentemente, foi necessário um menor número de subamostras para estimá-la com precisão. Admitindo-se o procedimento de retirar cinco subamostras por tratamento, obteve-se um erro em torno do valor médio da produtividade de grãos de milho de 10%. Porém, para a cultura do feijão, semente após preparo com arado de aiveca, foi de 30%.

Na análise de duas malhas de dados instaladas em Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, usadas no estudo da variabilidade espacial de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico semeado com feijão, sob plantio direto (Souza *et al.*, 2001) e sob preparo convencional (Carvalho *et al.*, 2002), com amostragem de solo idêntica nos dois casos, nas profundidades de 0-0,05m e 0,15-0,20m, verificou-se que a porosidade total e a densidade do solo seguiram a distribuição normal de dados, com exceção da densidade do solo, na subsuperfície e com preparo convencional, na qual foi lognormal. Tais atributos, em todos os casos, apresentaram baixa variabilidade dos dados. Já com relação à dependência espacial, apresentaram-na de forma moderada, com exceção da densidade do solo (na subsuperfície e com preparo convencional), na qual foi baixa e com alcances entre 1,0 e 22,6 m.

Carvalho *et al.* (2003) estudaram a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solo sob a cultura da videira (*Vitis vinifera* L.). Observaram que a macroporosidade apresentou distribuição de frequência lognormal. Já a microporosidade, porosidade total e a densidade do solo apresentaram distribuição normal. Por outro lado, os atributos que apresentaram distribuição normal e lognormal revelaram, respectivamente, fraca e forte assimetria. Entretanto, todos apresentaram a forma platicúrtica de distribuição e a variabilidade entre baixa e média, assim como dependência espacial variando entre 4,0 e 4,3 m.

A produtividade de grãos de milho (PG), quando estudada sob a ótica da variabilidade espacial, não é tão facilmente encontrada na literatura. Em termos norte-americanos, como exemplo, Timlin *et al.* (1998) observaram-na com variabilidade entre baixa e média. Em termos nacionais (Vieira e Gonzalez, 2003; Silva *et al.*, 2003; Veronese Junior, 2004) ela foi relatada com alta variabilidade de seus dados, cuja distribuição de frequência foi normal e com valores médios entre 4,80 – 6,03 t/ha. No âmbito geoestatístico, os modelos de ajuste observados foram o esférico e o exponencial, com alcances da dependência espacial de 4,5 m (Silva *et al.*, 2003), 15,3 m (Veronese Junior, 2004) e 65,0 m (Vieira e Gonzalez, 2003). Por outro lado, a correlação entre a PG e a resistência à penetração variou entre 0,131 e 0,176, ora direta ora inversamente (Veronese Junior, 2004).

Na análise geoestatística, a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuarão a krigagem. Nesta análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado por meio da krigagem como se não existisse. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* medidos para todos os pontos. Um ajuste perfeito teria um coeficiente de regressão igual a um, tendo sua respectiva linha coincidindo com aquela do modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear (a) igual a zero e o angular (b) igual a um (Robertson, 1998).

O milho é cultivado em todo território nacional, destacando-se das demais culturas por ocupar a maior área de plantio. É o produto agrícola de maior volume produzido, respondendo pelo segundo maior valor, superado apenas pela soja. No tocante a sua utilização, é o principal insumo empregado na industrialização de rações destinadas a alimentação animal, representando 80% de sua produção total. Por outro lado, seu emprego na alimentação humana é de reduzida expressão, respondendo por apenas 13% de sua produção (Souza e Braga, 2004). Tomando-se por base a série temporal 1990-2004 (FAO, 2005), em termos mundiais o Brasil é o terceiro maior produtor,

tendo colhido 33.10^6 t, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (231.10^6 t) e da China (123.10^6 t). Contudo, em relação à produtividade média mundial (4,000 t/ha), situou-se em 24º lugar com 2,708 t/ha, ficando atrás de 23 outros países, dos quais Israel ocupou o primeiro (12,627 t/ha) e o Uruguai (2,797 t/ha) o 23º. Os Estados Unidos (8,121 t/ha), Alemanha (7,917 t/ha), Argentina (4,998 t/ha) e a China (4,815 t/ha) ficaram respectivamente em 9º, 10º, 15º e 16º lugares. Já em relação ao panorama nacional, no mencionado período, o Distrito Federal e Pernambuco foram respectivamente os estados de maior (4,688 t/ha) e menor (0,389 t/ha) produtividade. Já os estados de Goiás (4,392 t/ha), Mato Grosso do Sul do Sul (4,336 t/ha), Paraná (4,049 t/ha) e São Paulo (3,716 t/ha) ocuparam respectivamente do segundo ao quinto lugares.

Portanto, o objetivo do presente trabalho, realizado num Latossolo Vermelho distroférico do Cerrado Brasileiro, foi analisar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial dos atributos do solo (densidade da partícula, densidade do solo e porosidade total) e da planta (produtividade de grãos de milho), e ainda estudar as correlações lineares (simples e múltiplas) e a correlação espacial entre tais atributos.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido no ano agrícola 2004/05, na Fazenda de Ensino e Pesquisa da Faculdade de Engenharia (FE/Unesp), Campus de Ilha Solteira, localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, na latitude $22^{\circ}23'$ S e longitude $51^{\circ}27'$ W, em área de domínio do Cerrado Brasileiro, com precipitação média anual de 1300 mm e temperatura média de $23,7^{\circ}\text{C}$. O tipo climático é Aw, segundo a classificação de Koeppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (Demattê, 1980). O solo, reclassificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), é um Latossolo Vermelho distroférico típico argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caulínítico, férrico, muito profundo, moderadamente ácido.

Antes da semeadura do milho, em 13/10/04, efetuou-se a caracterização inicial do solo com o objetivo de subsidiar a discussão final. Tomaram-se amostras com estrutura deformada, nas profundidades de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, com um trado de caneca. O posicionamento de coleta de cada uma das vinte amostras simples foi efetuado aleatoriamente na área experimental. Portanto, para as três camadas, foram constituídas amostras compostas, destinadas às análises químicas de rotina para fins de fertilidade, procedendo-se metodologia adotada pela Embrapa (1997).

A planta-teste trabalhada foi o milho (*Zea mays* L.), estabelecido numa área irrigada com pivô central, cultivada há dez anos, em sucessão e rotação de culturas, no sistema plantio direto. A semeadura foi procedida no sistema de plantio direto, em 22/10/04, com espaçamento entre linhas de 0,85 m e densidade de 7 sementes por metro na linha de semeadura. Para tanto, foi efetuada a dessecação inicial das plantas daninhas com o herbicida glifosato, na dosagem de 1,8 kg/ha do ingrediente ativo. A cultivar semeada foi a Agromen 31A31, conduzida segundo as instruções agrícolas para as principais culturas econômicas do Estado de São Paulo (Fahl *et al.*, 1998).

Foram definidas as direções dos eixos cartesianos da malha experimental num lançante da cultura do milho, previamente estabelecida entre dois terraços agrícolas. Para tanto, foi utilizado um nível ótico comum, efetuando-se o estaqueamento no dia 3/11/04. A malha experimental ficou constituída de cinco transeções paralelas ao eixo x, contendo 16 pontos de amostragem cada. Neste caso, foi estabelecido um total de 80 pontos, espaçados de 10 m x 10 m, numa área total de 0,8 ha (160 m x 50 m). Também foram alocadas por sorteio, dentro da grande malha, mais duas pequenas malhas de pontos, visando detalhar o estudo da dependência espacial para condições menores do que 10 m. Ficaram estabelecidas aleatoriamente, entre duas linhas e duas colunas, com um total de 40 pontos amostrais, espaçados de 2,0 m. Portanto, o total de pontos da malha foi de 120.

Os atributos pesquisados foram do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral, nas profundidades de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. Os do solo, coletados em 24/11/04, foram a densidade da partícula (DP), a densidade do solo (DS) e a porosidade total (PT), enquanto que o da planta foi a produtividade de grãos do milho (PG), coletado em 6/3/05. Para a determinação da densidade da partícula coletaram-se amostras deformadas com o trado de caneca, com diâmetro interno e altura respectivamente de 0,08 m e 0,20 m (volume = $4,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$), sendo empregado o Método do Álcool. Para a densidade do solo foi empregado o Método do Anel Volumétrico, coletando-se amostras indeformadas, com anéis de 0,056 m de diâmetro interno e 0,041 m de altura (volume = $1,009.10^{-4} \text{ m}^3$). Ambas foram dimensionadas em $[\text{kg}/\text{dm}^3]$ e processadas no Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Engenharia – FE/Unesp, Campus de Ilha Solteira. A porosidade total foi calculada pela seguinte expressão:

$$PT=[1-(DS/DP)] \quad (1)$$

onde: PT é a porosidade total $[\text{m}^3/\text{m}^3]$, DS e DP são

respectivamente a densidade do solo e densidade da partícula sólida do solo [kg/dm^3], determinadas conforme a Embrapa (1997). A produtividade de grãos foi coletada nas condições de umidade de campo, numa área de $11,56 \text{ m}^2$ ($3,4 \text{ m} \times 3,4 \text{ m}$) contendo 4 linhas de plantas para todos os pontos amostrais. Seus valores foram transformados para as condições padronizadas de $0,13 \text{ kg}/\text{kg}$ de umidade, sendo representada em $[\text{t}/\text{ha}]$. Considerando-se as três profundidades estudadas do solo, a relação total dos seus 9 atributos estudados foi: a) de 0-0,10 m: DP1, DS1 e PT1, b) 0,10-0,20 m: DP2, DS2 e PT2, e c) 0,20-0,30 m: DP3, DS3 e PT3.

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva inicial auxiliada pela estatística clássica. Utilizando-se o SAS (Schlotzhaver e Littell, 1997) foram calculados a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Seguidamente, foram identificados os *outliers*, conforme indicação do gráfico de ramos e folhas, efetuando-se a substituição deles pelo valor médio dos circunvizinhos. Também foi efetuada a análise da distribuição de frequência. Desta forma, para testar a hipótese de normalidade dos atributos (x), ou de lognormalidade deles (X), foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Nele, a estatística W testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal (x). Assim, no caso de dados transformados na forma logarítmica ($X = \ln x$), W testa a hipótese nula de que os valores X provêm de uma distribuição normal, isto é, os dados não transformados (x) ajustam-se a uma distribuição lognormal.

Foi montada a matriz de correlação, objetivando efetuar as regressões lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados (solo e planta). O objetivo foi estudar a correlação linear entre eles, na tentativa de procurar selecionar aqueles que provavelmente proporcionariam semivariograma cruzado e, portanto, cokrigagem. Para tanto foi utilizada a planilha de cálculos Excel. Por outro lado, para cada camada estudada do solo, assim como para todas elas conjuntamente, efetuaram-se regressões lineares múltiplas entre suas variáveis independentes (solo) e a dependente (PG), objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionaram as melhores relações entre causa e efeito. Para isso, foi utilizado o SAS, por intermédio do *step wise*.

Para cada atributo foi efetuada a análise da dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote computacional GS^+ (Robertson, 1998). O ajuste do semivariograma, em função dos seus modelos, foi efetuado pela seleção inicial de: a) o maior coeficiente de determinação (r^2); b)

a menor soma dos quadrados dos desvios (RSS), e c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo representante do ajuste foi efetuada por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita (C_0), alcance (A_0) e o patamar (C_0+C). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme sugestões de Cambardella *et al.* (1994), modificada por Robertson (1998) conforme a seguinte expressão:

$$\text{ADE} = [C/(C + C_0)] \cdot 100 \quad (2)$$

onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural, e $C+C_0$ é o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a) $\text{ADE} \leq 25\%$ indicando variável espacial fracamente dependente; b) $25\% < \text{ADE} \leq 75\%$ indicando variável espacial medianamente dependente, e c) $\text{ADE} > 75\%$ indicando variável espacial fortemente dependente. Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuarão a krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas de krigagem para o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios de alguns atributos químicos do solo, obtidos antes do seu preparo. Os dados mostraram um teor de matéria orgânica entre médio e baixo, assim como, médios teores de P, K, Ca e Mg, que puderam ter contribuído para uma média produtividade de grãos da cultura.

Tabela 1. Levantamento de alguns atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, realizado antes da semeadura do milho.

Profundidade m	pH	MO	P	Complexo sortivo						V	
				K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB		CTC
0-0,10	5,1	24	24	4,9	27	16	34	1	48,1	82,1	59
0,10-0,20	5,0	21	21	3,3	22	14	38	2	38,9	76,9	51
0,20-0,30	5,1	17	7	1,8	17	13	34	1	32,6	66,6	49

A variabilidade de um atributo pode ser classificada, segundo Gomes (1984), de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação. Assim, a variabilidade da DP1, DP2 e DP3 foi baixa, concordando com Farias *et al.* (2004), os quais observaram um coeficiente de variação de 4,5%. Os coeficientes de variação desse atributo ficaram entre 2,5 e 3,0%. Já para a DS, a variabilidade também foi baixa nas três profundidades (DS1, DS2, DS3), com coeficiente de variação entre 5,6 e 6,1%, concordando

com Souza *et al.* (2001), Carvalho *et al.* (2002; 2003), Farias *et al.* (2004), Souza *et al.* (2004). A PT também apresentou baixa variabilidade, com coeficiente de variação entre 6,9 a 7,8% nas três profundidades (PT1, PT2, PT3), concordando com Souza *et al.* (2001) e Carvalho *et al.* (2002), porém, discordando de Carvalho *et al.* (2003), na qual foi média. Finalmente, a PG apresentou uma média variabilidade, com o coeficiente de variação de 14,4%, concordando com a maioria dos dados de Timlin *et al.* (1998) e, no entanto, discordando de Silva *et al.* (2003) e Veronese Junior (2004), nos quais ele foi alto (Tabela 2).

Em relação à distribuição de frequência dos atributos, a DS em todas as profundidades apresentou distribuição normal, concordando com Souza *et al.* (2001), Carvalho *et al.* (2003), Souza *et al.* (2004) e Farias *et al.* (2004). Porém, discordou de Carvalho *et al.* (2002), que apresentou distribuição de frequência tendendo a lognormal, para DS na profundidade de 0,15 – 0,20m. Já a PT apresentou, em todas

profundidades, distribuição normal. Resultados semelhantes foram encontrados por Souza *et al.* (2001) e Carvalho *et al.* (2003). Finalmente, a PG apresentou distribuição do tipo tendendo à normalidade, concordando em parte com Silva *et al.* (2003), no qual foi normal (Tabela 2).

Na Tabela 2, os valores médios da DP do presente trabalho foram 2,77 kg/dm³, para as três profundidades. Em relação à DS, seus valores médios em profundidade foram 1,42; 1,48 e 1,47 kg/dm³. Este fato concordou em magnitude com os dados de Souza *et al.* (2001; 2004) e Carvalho *et al.* (2003) e, no entanto, discordou em parte de Carvalho *et al.* (2002), nos quais a DS foi de 1,19 kg/dm³. Já com relação a PT, seus valores variaram entre 0,463–0,489 m³/m³, ficando essa quantia abaixo do valor de 0,5 m³/m³ referente ao solo ideal, o qual foi preconizado por Baver *et al.* (1973) e Kiehl (1979). Esse fato também pôde sugerir que a produtividade de grãos de milho, do presente trabalho, talvez não viesse a alcançar um valor satisfatório.

Tabela 2. Medidas estatísticas descritivas e distribuição de frequência dos atributos da cultura do milho e de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul.

Atributo ⁽¹⁾	Medidas estatísticas descritivas											Probabilidade ⁽²⁾ do teste		
	Média	Mediana	Moda	Erro padrão da média	Valor			Desvio padrão	Coeficiente			Pr<w	DF	
					Mínimo	Máximo	Amplitude		Variação (%)	Curtose	Assimetria			
Densidade da partícula														
DP1 (kg/dm ³)	2,772	2,782	2,740	6,512.10 ⁻³	2,612	2,958	3,460.10 ⁻¹	7,133.10 ⁻²	2,6	-4,192.10 ⁻¹	-1,359.10 ⁻¹	3,218.10 ⁻¹	NO	
DP2 (kg/dm ³)	2,771	2,777	2,794	6,333.10 ⁻³	2,601	2,931	3,300.10 ⁻¹	6,937.10 ⁻²	2,5	-3,684.10 ⁻¹	-2,012.10 ⁻¹	4,639.10 ⁻¹	NO	
DP3 (kg/dm ³)	2,775	2,775	2,799	7,545.10 ⁻³	2,532	2,944	4,120.10 ⁻¹	8,265.10 ⁻²	3,0	1,140.10 ⁻¹	-4,379.10 ⁻¹	8,190.10 ⁻²	NO	
Densidade do solo														
DS1 (kg/dm ³)	1,416	1,416	1,311	7,866.10 ⁻³	1,243	1,633	3,900.10 ⁻¹	8,617.10 ⁻²	6,1	5,857.10 ⁻¹	8,541.10 ⁻²	4,470.10 ⁻¹	NO	
DS2 (kg/dm ³)	1,480	1,478	1,449	7,507.10 ⁻³	1,284	1,694	4,100.10 ⁻¹	8,224.10 ⁻²	5,6	9,003.10 ⁻²	6,499.10 ⁻²	7,338.10 ⁻¹	NO	
DS3 (kg/dm ³)	1,471	1,483	1,422	7,642.10 ⁻³	1,284	1,653	3,690.10 ⁻¹	8,372.10 ⁻²	5,7	-4,660.10 ⁻¹	-2,060.10 ⁻¹	2,544.10 ⁻¹	NO	
Porosidade total														
PT1 (m ³ /m ³)	4,893.10 ⁻¹	4,910.10 ⁻¹	4,870.10 ⁻¹	3,254.10 ⁻³	3,810.10 ⁻¹	5,630.10 ⁻¹	1,820.10 ⁻¹	3,565.10 ⁻²	7,3	-3,645.10 ⁻²	-2,200.10 ⁻¹	4,243.10 ⁻¹	NO	
PT2 (m ³ /m ³)	4,634.10 ⁻¹	4,635.10 ⁻¹	4,290.10 ⁻¹	2,908.10 ⁻³	3,900.10 ⁻¹	5,550.10 ⁻¹	1,650.10 ⁻¹	3,186.10 ⁻²	6,9	6,795.10 ⁻²	2,005.10 ⁻¹	8,839.10 ⁻¹	NO	
PT3 (m ³ /m ³)	4,692.10 ⁻¹	4,690.10 ⁻¹	4,540.10 ⁻¹	3,351.10 ⁻³	3,500.10 ⁻¹	5,550.10 ⁻¹	2,050.10 ⁻¹	3,671.10 ⁻²	7,8	4,919.10 ⁻¹	-1,970.10 ⁻¹	5,238.10 ⁻¹	NO	
Produtividade de grãos														
PG (t/ha)	8,012	8,113	7,676	1,051.10	5,004	10,590	5,586	1,152	14,4	-2,577.10 ⁻¹	-4,450.10 ⁻¹	4,380.10 ⁻²	TN	

⁽¹⁾ DP, DS e PT de 1 a 3 são, respectivamente, a densidade da partícula, densidade do solo e porosidade total em profundidade no solo, e PG= produtividade de grãos; ⁽²⁾ DF= distribuição de frequência sendo, respectivamente, NO e TN do tipo normal e tendendo à normal.

Contudo, com respeito à produtividade de grãos (8,012 t/ha), seu elevado valor atestou que a cultura do milho apresentou-se com alta produtividade. Sua magnitude, em relação ao rol dos países produtores deste cereal, posicionou-se entre a dos Estados Unidos e da Alemanha que produziram, na série temporal 1990–2004 referida pela FAO (2005), respectivamente as quantias de 8,121 e 7,917 t/ha. Outrossim, em termos nacionais, superou substancialmente os dados gerais de produtividade, que variaram entre 0,389 e 4,688 t/ha, respectivamente para o estado de Pernambuco e o Distrito Federal. Assim sendo, o elevado valor da PG evidenciou que, tanto os baixos teores de matéria orgânica, P, K, Ca e Mg (Tabela 1), como os baixos valores da macroporosidade, inferiores aos do solo

ideal (Tabela 2), não foram tão limitantes a ponto de restringir a magnitude do apreciável valor da produtividade média de grãos do presente (8,012 t/ha).

A Tabela 3 apresenta a matriz de correlação linear simples entre a produtividade de grãos de milho e os atributos estudados do solo. Os valores extremos do coeficiente de correlação foram de -0,901 e -0,007, respectivamente para os pares DS1xPT1 e DP3xDS1. Seguindo o critério de classificação do coeficiente de correlação (Sharp, s/d), os pares de atributo DS1xPT1, DS2xPT2 e DS3xPT3 apresentaram correlações extra-altas, respectivamente com valores de -0,901; -0,899 e -0,884. Como não houve alta correlação, os pares que apresentaram-na de forma média foram DS2xDS3 (r=0,410), DS3xPT2 (r=-

0,428) e PT2xPT3 ($r=0,403$). Os de baixa correlação foram DP3xPT3 ($r=0,217$), DS1xDS3 ($r=0,297$), DS1xPT3 ($r=-0,253$), DS2xPT3 ($r=-0,389$), DS3xPT1 ($r=-0,289$), DS3xPG ($r=-0,212$) e PT1xPT3 ($r=0,225$). O restante dos pares teve nula correlação. Dos 45 coeficientes de correlação apresentados, os 13 supracitados (3 extra-altos, 3 médios e 7 baixos) representaram apenas 28,9% deles. Portanto, os 32 restantes, que possuíram nula correlação, constituíram 71,1%.

A grande diferença na magnitude dos coeficientes de correlação, entre os extra-altos e os imediatamente abaixo, os médios, foi devido à metodologia empregada. Isto porque, conforme a Equação 1, a DS faz parte do cálculo da PT. Por outro lado, a correlação negativa entre os pares extra-altos (DS1xPT1, DS2xPT2 e DS3xPT3) revelou uma satisfatória coerência científica, isto é, para cada camada analisada, o aumento na DS proporcionou diminuição da PT, sendo verdadeiro o inverso (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de correlação linear simples entre os atributos da cultura do milho e de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul.

Atributo ⁽¹⁾	Coeficiente de correlação									
	DP1	DP2	DP3	DS1	DS2	DS3	PT1	PT2	PT3	PG
DP1	1									
DP2	-0,152	1								
DP3	0,145	0,073	1							
DS1	0,017	0,036	-0,007	1						
DS2	-0,079	-0,063	-0,076	0,150	1					
DS3	-0,015	-0,042	-0,108	0,297	0,410	1				
PT1	0,074	-0,091	0,019	-0,901	-0,178	-0,289	1			
PT2	-0,028	0,193	0,063	-0,132	-0,899	-0,428	0,124	1		
PT3	0,086	0,026	0,217	-0,253	-0,389	-0,884	0,225	0,403	1	
PG	-0,106	-0,041	-0,060	0,045	0,035	-0,212	-0,090	0,025	0,118	1

⁽¹⁾ DP, DS e PT de 1 a 3 são, respectivamente, a densidade da partícula, densidade do solo e porosidade total em profundidade no solo, e PG= produtividade de grãos;

Os pares de atributos cujas correlações foram extra-altas, médias e baixas apresentaram correlação positiva, indicando função crescente entre causa e efeito, sendo o inverso para a correlação negativa. Assim, foi notada coerência científica para os seguintes pares de correlação positiva: DP3xPT3, DS1xDS3, PT1xPT3, DS2xDS3, PT2xPT3; assim como entre os de correlação negativa: DS1xPT3, DS2xPT3, DS3xPT1, DS3xPG, DS3xPT2, DS1xPT1, DS2xPT2 e DS3xPT3 (Tabela 3).

No geral, as correlações lineares simples entre as variáveis independentes do solo (DP1, DP2, DP3, DS1, DS2, DS3, PT1, PT2, PT3) com a variável dependente da planta (PG) apresentaram coeficientes de correlação nulos, com exceção do par DS3xPG no qual foi baixo e inverso ($r=-0,212$). Assim, com determinada reserva devido ao baixo coeficiente de correlação, pôde-se observar que com aumento da DS3 ocorreu uma diminuição da produtividade de

grão de milho (Tabela 3). O valor da referida correlação (- 0,212) foi apenas pouco superior àqueles de Veronese Junior (2004), os quais variaram entre 0,131 e 0,176, quando correlacionada a produtividade de grãos de milho com a resistência mecânica à penetração. Contudo, ficou entre aqueles obtidos entre a referida produção e a umidade gravimétrica do solo, os quais variaram entre -0,031 e 0,301.

As correlações lineares múltiplas, efetuadas entre a PG e todos os atributos do solo (1080 dados), assim como entre a PG e todos os atributos, camada por camada (360 dados), revelaram os seguintes ajustes: a) para todos os atributos analisados das 3 camadas:

$$PG = 27,239 - 7,762 \cdot DS3 - 5,678 \cdot PT1 - 10,720 \cdot PT3 \quad (3)$$

$$(r^2=0,100; P<0,10)$$

Apenas para a terceira camada, uma vez que para as duas primeiras não ocorreram significâncias entre quaisquer das variáveis analisadas:

$$PG = 22,651 - 6,772 \cdot DS3 - 9,965 \cdot PT3 \quad (4)$$

$$(r^2=0,07; P<0,1)$$

onde: PG é a produtividade de grãos de milho (t/ha), DS3 (kg/dm^3) e PT3 (m^3/m^3) são respectivamente a densidade do solo e sua porosidade total na terceira camada, e PT1 (m^3/m^3) é a porosidade total do solo na primeira camada. Desta forma, as Equações 3 e 4 revelaram que com o aumento da DS3, da PT1 e da PT3 ocorreu uma diminuição da produtividade de grãos de milho (PG).

A análise geoestatística evidenciou que, de todos os atributos estudados, a DP1, DP2, DP3, DS2, DS3, PT2 e a PT3 não apresentaram dependência espacial, comprovado pelos semivariogramas presentes na Tabela 4, nos quais são apresentados exemplos típicos de efeito pepita puro. Assim, a DS1, a PT1 e a PG mostraram que a distribuição destes atributos no espaço não é aleatória, uma vez que suas classes de dependência espacial variaram entre 50,1% (DS1 e PG) e 68,5% (PT1). Para a DS1 e a PG, cuja classe de dependência espacial foi moderada, houve concordância com Souza *et al.* (2004). Entretanto, discordou de Carvalho *et al.* (2002), Gontijo *et al.* (2003) e Farias *et al.* (2004), nos quais foi fraca. Já para a PT1, a dependência espacial foi de 68,5%, considerada moderada, concordando com Souza *et al.* (2001) e Carvalho *et al.* (2002), assim como, discordando de Veronese Junior (2004) na qual foi forte (82,1%). Portanto, no presente estudo, pôde-se constatar que 50,1% da variação total da produtividade de grãos foram explicados pela

dependência espacial. Assim sendo, o efeito do erro atribuído ao acaso, referente ao efeito pepita, foi de 49,9%. Por outro lado, com base na validação cruzada, os modelos dos semivariogramas ajustados para realização da krigagem, no presente estudo, apresentaram-se como satisfatórios, uma vez que seus coeficientes lineares (a) foram de 0,023 (DS1), -0,093 (PT1) e de -0,530 (PG), isto é, próximos de zero. Também, os angulares (b) foram de 0,997 (DS1), 0,925 (PT1) e 1,064 (PG), ficando próximos da unidade. Em relação aos coeficientes de correlação, foram de 0,722 (DS1), 0,783 (PT1) e de 0,687 (PG).

Na Tabela 4, a DP resultou efeito pepita puro em todas as profundidades, discordando de Farias *et al.* (2004), no qual o modelo ajustado foi o esférico. Já a DS1 se ajustou ao modelo esférico,

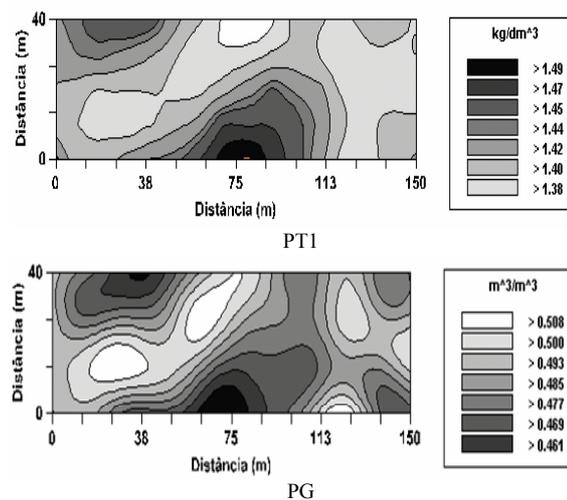
concordando com Carvalho *et al.* (2002; 2003), na profundidade de 0-0,05 m e Farias *et al.* (2004). Para a PT1, os dados se ajustaram ao modelo gaussiano, concordando com Carvalho *et al.* (2002), e discordando de Souza *et al.* (2001) e Carvalho *et al.* (2003), nos quais foram esférico e exponencial, respectivamente. Com relação ao alcance da dependência espacial, a DS1 apresentou-o com 60,6 m, ao passo que na PT1 foi de 28,6 m. Esses valores foram superiores aos de Carvalho *et al.* (2002), os quais relataram o alcance da PT com 8,6 m, e para a DS com 13,1 m, para a profundidade de 0-0,05 m. A PG apresentou alcance de 41,1 m, sendo superior aos valores de 4,5; 6,1 e 15,3, obtidos respectivamente por Silva *et al.* (2003), Veronese Junior (2004) e Santos *et al.* (2005).

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas ajustados aos atributos da cultura do milho e de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul.

Atributo ⁽¹⁾	Modelo ⁽²⁾	Parâmetros							Classe de dependência espacial
		Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)	Variância Estrutural (C)	Alcance (m) (A ₀)	r ²	SQR ⁽³⁾	ADE ⁽⁴⁾	
Densidade da partícula									
DP1 (kg/dm ³)	epp	4,920.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
DP2 (kg/dm ³)	epp	4,830.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
DP3 (kg/dm ³)	epp	6,797.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
Densidade do solo									
DS1 (kg/dm ³)	esférico	2,800.10 ⁻³	5,612.10 ⁻³	2,812.10 ⁻³	60,6	0,819	2,102.10 ⁻⁶	0,501	moderada
DS2 (kg/dm ³)	epp	6,871.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
DS3 (kg/dm ³)	epp	7,040.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
Porosidade total									
PT1 (m ³ /m ³)	gaussiano	1,960.10 ⁻⁴	6,230.10 ⁻⁴	4,270.10 ⁻⁴	28,6	0,930	1,079.10 ⁻⁸	0,685	moderada
PT2 (m ³ /m ³)	epp	1,038.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
PT3 (m ³ /m ³)	epp	1,330.10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-
Produtividade de grãos									
PG (t/ha)	esférico	4,170.10 ⁻¹	8,350.10 ⁻¹	4,180.10 ⁻¹	41,1	0,958	3,553.10 ⁻³	0,501	moderada

⁽¹⁾ DP, DS e PT de 1 a 3 são, respectivamente, a densidade da partícula, densidade do solo e porosidade total em profundidade no solo, e PG= produtividade de grãos; ⁽²⁾ epp = efeito pepita puro; ⁽³⁾ SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ⁽⁴⁾ ADE = avaliador da dependência espacial.

Na Figura 1 são apresentados os mapas de krigagem da DS1, PT1 e da PG, obtidos por meio da interpolação por krigagem. Foi evidenciada uma substancial correlação espacial entre o par DS1xPT1, os quais apresentaram, na Tabela 3, o maior coeficiente de correlação (-0,901). Por outro lado, com relação ao referido par, notou-se que seus mapas de krigagem possuíram uma harmônica e inversa proporcionalidade, isto é, da ocorrência dos maiores valores da DS1 (1,45-1,49 kg/dm³) em coincidência com os menores valores da PT1 (0,461-0,469 m³/m³), sendo perfeitamente válido o inverso, assim como, sugerindo, muito provavelmente, a existência de cokrigagem entre tais pares de atributos. Entretanto, não foram observadas aceitáveis correlações espaciais, tanto da PG com a DS1, assim como com a PT1 (evidenciadas na Figura 1).



DS1

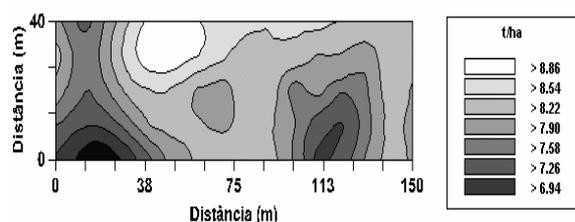


Figura 1. Mapas de krigagem dos atributos da cultura do milho e de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul.

Assim, nos três mapas de krigagem houve apenas coerência da correlação espacial nas faixas norte-sudoeste e norte-leste, nas quais foram observados: a) os menores valores da DS1 ($1,38-1,42 \text{ kg/dm}^3$), b) os maiores valores da PT1 ($0,485-0,508 \text{ m}^3/\text{m}^3$), e c) as maiores produtividades de milho ($8,22-8,86 \text{ t/ha}$). Contudo, nas demais regiões essas correlações foram difusas e, portanto, não evidentes. Uma vez que o coeficiente de correlação dos pares de atributos PGxDS1 e PGxPT1 resultaram correlação nula (Tabela 3), respectivamente com valores de 0,045 e -0,090, pôde-se constatar que as correlações, linear e espacial, entre tais pares foram praticamente inexistentes.

Conclusão

Os atributos do solo apresentaram baixa variabilidade de seus dados, enquanto que no da planta foi média. A densidade do solo, a porosidade total, na camada superficial, e a produtividade de grãos não variaram aleatoriamente. Seguiram padrões espaciais bem definidos, com semivariogramas esférico e gaussiano, com alcances entre 28,6 e 60,6 m.

Entre os atributos do solo, a elástica correlação linear simples entre eles variou entre nula e extra-alta. Já entre a produtividade de grãos, e todos os atributos do solo, variou pouco, ficando entre nula e baixa. Contudo, ainda que com reservas devido à baixa correlação, com o aumento da densidade do solo da terceira camada ocorreu uma diminuição da produtividade de grãos de milho. Por outro lado, a correlação espacial entre os atributos do solo e a produtividade de grãos foi praticamente inexistente. Já exclusivamente entre os do solo ela foi elevada, e

As correlações lineares múltiplas indicaram que a PT1, a PT3 e a DS3 foram atributos significativos quando correlacionados com a produtividade de grãos de milho.

Referências

BAVER, L.D. et al. *Física de suelos*. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of

soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO, M.P. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul do Sul. *Acta Sci.*, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1353-1361, 2002.

CARVALHO, M.P. et al. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.

CUNHA, A.A. et al. Variabilidade da produtividade de grãos de milho e de feijão em um Latossolo submetido a diferentes preparos do solo. *Eng. Agric.*, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 93-100, 2002.

DEMATTE, J.L.I. *Levantamento detalhado de solos do "Campus Experimental de Ilha Solteira"*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1980.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa, 1999.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

FAHL, J.I. et al. *Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas*. 6. ed. Campinas: Instituto Agrônomo (Boletim técnico, 200), 1998.

FAO. *Base de dados estatísticos - Agricultura*. Disponível em:

<<http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture&language=ES>>. Acesso em: 02 mar. 2005.

FARIAS, L.N. et al. Variabilidade espacial de alguns parâmetros físico-hídricos de solos de uma pastagem do sistema integrado de produção agroecológica (Fazendinha km-47). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. 2004, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2004. (CD Rom).

GOMES, F.P. *A estatística moderna na pesquisa agropecuária*. Piracicaba: Patafós, 1984.

GONTIJO, I. et al. Uso da geoestatística no estudo de atributos físicos em solo de cerrado de Minas utilizado com café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 24., 2003. Ribeirão Preto. *Anais...* Ribeirão Preto: Universidade Estadual Paulista, 2003. (CD Rom).

KIEHL, E.J. *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1979.

KONOPATZKI, E.A. Comparação entre solos usando o ensaio de densidade real e teste de granulometria. 2003. Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste). Disponível em: <<http://efahk.com.br/artigo.doc>>. Acesso em: 1 maio 2003.

ROBERTSON, G.P. *GS⁺: geostatistics for the environmental sciences*. Michigan: Gamma Design Software, 1998.

SANTOS, P.A. et al. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um latossolo vermelho distrófico. *Rev. Bras.*

- Cienc. Solo*, Viçosa, v. 29, p. 287-295, 2005.
- SILVA, V.R. *et al.* Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.
- SHARP, s/d. *Instructor manual. scientific computer*, Japan: Model EL-5500 II. Sharp Eletronics Corporation.
- SMECK, N.E. *et al.* Dynamics and genetic modelling of soil systems. In: WILDING, L.P. *et al.* (Ed.). *Pedogenesis and soil taxonomy*. I. Concepts and interactions. Amsterdam: Elsevier Scientific, cap. 3, p. 51-81. 1983.
- SOUZA, L.S. *Variabilidade espacial do solo em sistema de manejo*. 1992. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- SOUZA, P.M.; BRAGA, M.J. Aspectos econômicos da produção e comercialização do milho no Brasil. In: GALVAO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. (Ed.). *Tecnologias de produção do milho*. Viçosa: UFV, 2004, p. 13-53.
- SOUZA, Z.M. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distroférico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001.
- SOUZA, Z.M. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas de relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 937-944, 2004.
- SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTLELL, R.C. *SAS system for elementary statistical analysis*. 2. ed. Cary: NC, SAS Institute Inc., 1997.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: complete samples. *Biometrika*, Oxford, v. 52, p. 591-611, 1965.
- TINLIM, D.J. *et al.* Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 62, n. 3, p. 764-773, 1998.
- VERONESE Jr., V. *Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional*. 2004. Monografia (Graduação em Agronomia)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2004.
- VIEIRA, S.R.; GONZALEZ, A.P. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, Campinas, v. 62, p. 127-38, 2003.

Received on November 26, 2005.

Accepted on July 06, 2006.