DOI: 10.4025/actasciagron.v31i1.6641

Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul

Mariana Ventura Martins[1*], Morel de Passos e Carvalho[2], Marcelo Andreotti[2] e Rafael Montanari[3]

*[1]Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Cx. Postal 31, 15385-000, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. [2]Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solo, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.. [3]Departamento de Agricultura, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: marivmartins@hotmail.com*

RESUMO. Os atributos físicos do solo têm se mostrado de grade interesse para a agricultura contemporânea, uma vez que refletem decisivamente sobre a produtividade vegetal. Em 2006, no campus da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp, analisou-se a produtividade do feijoeiro (PG) no sistema plantio direto irrigado, a resistência mecânica do solo à penetração (RP), a densidade do solo (DS) e as umidades gravimétrica (UG) e volumétrica (UV) em profundidade, num LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico. O objetivo foi determinar as correlações lineares e espaciais, entre os atributos estudados, visando selecionar um indicador da qualidade física do solo de boa representatividade para a PG. Foi instalada a malha, para a coleta de dados contendo 135 pontos amostrais, numa área de 7.500 m^2. A correlação linear entre a produtividade de grãos com os atributos do solo foi baixa. As de melhor correlação com a PG foram a DS1 e RP1. Contudo, do ponto de vista espacial, houve significativa correlação inversa entre a PG e DS1. Portanto, no presente trabalho, dentre os atributos estudados, a DS, avaliada na camada de 0-0,10 m, apresentou-se como o melhor indicador da qualidade física de um Latossolo de Selvíria, quando destinado à produtividade de grãos de feijão.

Palavras-chave: manejo do solo, qualidade física do solo, plantio direto, agricultura de precisão, *Phaseolus vulgaris.*

ABSTRACT. Linear and spatial correlation between bean grain yield with physical soil attributes. The attributes of plant, in no-tillage (bean grain yield – GY) and soil (mechanical resistance to penetration – RP, bulk density – BD, gravimetric – GM, and volumetric –VM moisture), in a Typic Acrustox soil at the Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (Unesp), Brazil, were analyzed in the year of 2006. The purpose was to study the variability and linear and spatial correlations among the attributes (plant and soil), aiming to select an index of soil physical quality with good capacity to represent bean grain productivity. A geostatistical grid was installed to collect soil and plant data, with 135 sample points, in an area of 7,500 m^2. The studied attributes showed high to low variability, with excellent spatial performances, and ranged between 13.9 and 39.8 meters. Otherwise, the linear correlation between GY and the soil attributes (RP, BD, GM and VM), due to the large number of data, were low. Those with best correlations with GY were BD1 and RP1. However, regarding spatial variability, an inverse correlation took place between GP and BD1. So, the bulk density, analyzed in soil surface layer, proved to be the best index of soil physical quality in Selvíria, for bean grain productivity.

Key words: soil management, soil physical quality, no-tillage, precision agriculture, *Phaseolus vulgaris.*

Introdução

A cultura do feijão constitui uma das mais importantes explorações agrícolas do Brasil, não só pela área cultivada e pelo valor da produção como também por ser considerada a principal fonte de proteína das populações de menor poder aquisitivo. No Brasil, sua produtividade média de grãos é muito baixa, ficando ao redor de 720 kg ha^{-1}. No entanto, a modalidade da cultura de sequeiro tem potencial para 1.000-2.500 kg ha^{-1} e a irrigada, entre 1.000-3.500 kg ha^{-1} (FAHL et. al, 1998; CONAB, 2006).

A densidade do solo é de grande importância para os estudos agronômicos, pois permite avaliar indiretamente atributos tais como porosidade, condutividade hidráulica, difusividade do ar, entre outros, além de ser utilizada como indicador do estado da compactação do solo (KIEHL, 1979; CAMARGO; ALLEONI, 1997). Por possuir estreita relação com outros atributos, a grande maioria das pesquisas converge para o fato de que, com o seu aumento, ocorre diminuição da porosidade total, macroporosidade, condutividade hidráulica e absorção iônica; com o consequente aumento da microporosidade e da resistência mecânica do solo à penetração, no geral, há diminuição da produtividade agrícola (GREGO; VIEIRA, 2005; MELO FILHO et al., 2006).

Dentre os atributos físicos do solo com influência direta sobre o desenvolvimento das plantas, destaca-se a resistência mecânica do solo à penetração. De acordo com Pedrotti et al. (2001), a qualidade física do solo pode ser determinada, dentre outros fatores, pelo grau da resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, uma vez que, em condições adversas, limita a elongação radicular e, consequentemente, reduz a produtividade vegetal. Os valores críticos de resistência mecânica do solo à penetração (RP) podem variar com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Entretanto, quando a coleta dos dados de RP for realizada no momento em que a umidade do solo equivaler aproximadamente a 2/3 da sua microporosidade (solo friável), inúmeros trabalhos, relacionando tal atributo físico do solo com a produtividade de grãos do feijoeiro, como os de Carvalho et al. (2006) e Santos et al. (2005), têm adotado a seguinte classificação de Arshad et al. (1996): a) extremamente baixa: RP < 0,01 MPa; b) muito baixa: 0,01 ≤ RP < 0,1 MPa; c) baixa: 0,1 ≤ RP < 1,0 MPa; d) moderada: 1,0 ≤ RP < 2,0 MPa; e) alta: 2,0 ≤ RP < 4,0 MPa; f) muito alta: 4,0 ≤ RP < 8,0 MPa e g) extremamente alta: RP > 8,0 MPa.

A utilização da geoestatística como ferramenta de estudo da variabilidade dos atributos do solo tem se mostrado de grande importância na interpretação e compreensão de resultados, com base na estrutura da sua variabilidade natural, principalmente da interação entre os atributos físicos do solo e a produtividade das culturas (LIMA et al., 2007). Dessa forma, na última década, foi verificado substancial aumento dos trabalhos científicos destinados à avaliação da produtividade vegetal em função da variabilidade espacial de atributos físicos do solo (FREDDI et al., 2005; SANTOS et al., 2005; CARVALHO et al., 2006; KITAMURA et al., 2007; LIMA et al., 2007).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou: a) analisar a variabilidade espacial dos atributos da planta e do solo; b) analisar as correlações lineares e espaciais entre a produtividade de grãos do feijão e os atributos físicos do solo; e c) identificar, entre os atributos do solo, um indicador da sua qualidade física, correlacionando produtividade de grãos do feijão para o local estudado.

Material e métodos

O experimento foi conduzido de agosto a novembro de 2006, no campus da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (Unesp), localizado em Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil (20º18'05" S e 20º18'28" S e 52º39'02" W e 52º40'28" W). A precipitação média anual é de 1.300 mm e a temperatura média é de 23,7ºC. O tipo climático é Aw, segundo Köeppen, caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo estudado, classificado conforme Embrapa (2006), foi o LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico muito argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caulinítico, férrico, epicompactado, muito profundo, moderadamente ácido.

A cultura trabalhada foi o feijão, cultivar IAC Carioca Eté. Sua semeadura foi efetuada no primeiro decêndio de agosto de 2006, no sistema plantio direto, em uma área terraceada e sob pivô central, cultivada, desde 1997, com a sucessão milho-feijão. Seguiram-se as instruções agrícolas para as principais culturas do Estado de São Paulo (FAHL et al., 1998), tomando-se por base a análise química inicial da fertilidade do solo para fins de rotina, que relacionou o seguinte: a) pH em $CaCl_2$ = 5,0; b) matéria orgânica = 26,5 g dm^{-3}; c) P = 18 mg dm^{-3}; d) K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB e CTC, respectivamente, com 4,1; 21,5; 15,0; 36,0; 1,0; 40,6 e 76,6 $mmol_c$ dm^{-3} e e) V = 53%. A semeadura foi efetuada com espaçamento entre linhas de 0,50 m, com uma densidade média final de 12 plantas por metro na linha de plantio. A colheita manual foi efetuada em meados de novembro de 2006.

Foram definidas as direções dos eixos cartesianos da malha de dados numa área do referido pivô, estabelecida entre dois terraços agrícolas. Assim, o eixo *x* foi ordenado em nível enquanto o *y* ficou no sentido do declive. A malha ficou constituída com um total de 135 pontos amostrais, distribuídos numa área de 7.500 m^2 (150 x 50 m). O espaçamento entre pontos amostrais utilizado na grande malha foi de 10 m; nas de refinamento, de 1 m. Estas últimas foram estabelecidas com a finalidade de detectar alcances da dependência espacial para espaçamentos menores do que 10 m. A área útil de coleta de dados dos atributos estudados, tanto do solo quanto da planta,

foi de 4 m^2, com a alocação do ponto amostral posicionado no seu centro, que conteve quatro linhas de semeadura.

A amostragem de cada atributo do solo e da planta foi realizada no entorno dos pontos amostrais. Os atributos do solo foram: densidade do solo (DS), umidade gravimétrica (UG), umidade volumétrica (UV) e a resistência mecânica do solo à penetração (RP), coletados nas profundidades de 0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m, em meados de novembro. Assim, foram identificados, em função das camadas de coleta, da seguinte forma: a) para a camada de 0-0,10 m, DS1, UG1, UV1 e RP1; b) para a camada de 0,10-0,20 m, DS2, UG2, UV2 e RP2; c) para a camada de 0,20-0,30 m, DS3, UG3, UV3 e RP3; e d) para a camada de 0,30-0,40 m, DS4, UG4, UV4 e RP14. Já para o atributo da planta, foi quantificada a produtividade de grãos (PG), em t ha^{-1}, corrigida para a umidade-padrão de 0,130 kg kg^{-1}.

A metodologia empregada para determinação dos atributos físicos do solo foi aquela determinada pela Embrapa (1997). Com a utilização de um trado de caneca, foram obtidas amostras deformadas de solo para determinar a umidade gravimétrica (UG). A densidade do solo (DS) foi determinada pelo método do anel volumétrico. A resistência à penetração (RP) foi obtida com o penetrômetro de impacto (modelo Planalsucar/IAA/Stolf). A expressão utilizada para o cálculo, determinada por Stolf (1991), é demonstrada na equação 1:

$$RP = \{ 5,581 + 6,891 . [N / (P - A) .10] \} . 0,0981 \quad (1)$$

em que: RP é a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); N é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para obtenção da leitura; A e P são as leituras antes e depois da realização dos impactos (cm).

Já a umidade volumétrica (UV) foi calculada segundo a expressão dada pela equação 2:

$$UV = UG . DS \quad (2)$$

em que: UV é a umidade volumétrica m^3 m^{-3}, UG; é a umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); e DS é a densidade do solo (kg dm^{-3}).

Para cada atributo estudado, foi efetuada a análise descritiva clássica. Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, realizou-se o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Foi montada a matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados. Também, conjuntamente para todas as camadas estudadas do solo, efetuou-se a regressão linear múltipla entre a variável dependente (PG) e as independentes (atributos do solo) por intermédio do *step wise* do pacote computacional SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997).

A análise geoestatística foi realizada pelo uso do *Gamma Design Software 7.0* (GS+, 2004). Aos atributos que apresentaram tendência nos seus dados foi aplicada a *técnica do refinamento pela mediana*, conforme preconizado por Silva et al. (2003). Os ajustes dos modelos dos semivariogramas simples e cruzados foram efetuados preferencialmente pela seleção do menor valor da soma dos quadrados dos desvios. A decisão sobre o modelo foi realizada pela análise da validação cruzada. A análise da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a seguinte expressão (KITAMURA et al., 2007):

$$ADE = [C/(C+Co)].100 \quad (3)$$

em que: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; C+Co é o patamar. Dessa forma, a interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: ADE $\leq$ 25% indica variável espacial fracamente dependente; 25% < ADE $\leq$ 75% indica variável espacial moderadamente dependente; e ADE > 75% indica variável espacial fortemente dependente.

Na interpretação dos dados e dos mapas de krigagem, para os atributos que apresentaram tendência e/ou lognormalidade, foi efetuado o seguinte: a) os atributos com tendência, cuja legenda de valores apresentou o resíduo dos dados originais, foram discriminados como r-ATR, e b) para o caso dos atributos que apresentaram distribuição lognormal, cuja legenda de valores apresentou o logaritmo dos dados originais discriminados como l-ATR, procedeu-se à retrotransformação, conforme preconizado por (DEUTSCH; JOURNEL, 1997).

Resultados e discussão

Na Tabela 1, a PG e a *l*-RP1 resultaram em elevada variabilidade de seus dados, com coeficientes de variação (CV) de 23,8 e de 28,9%, respectivamente; na RP2, RP3 e na *l*-RP4, ela foi média (15,1-17,9%). Nos demais atributos, o coeficiente de variação foi baixo (4,2-9,9%). Dessa forma, a variabilidade desses dados foi da mesma ordem de grandeza que os dados apresentados por Carvalho et al. (2003), Freddi et al. (2005), Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e de Kitamura et al. (2007), os quais também trabalharam com Latossolos típicos do Cerrado Brasileiro.

Tabela 1. Análise descritiva da produtividade de grãos de feijão e de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria (Estado de Mato Grosso do Sul).

ATRIBUTO[(a)]	MEDIDAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS								
	Média	MEDIANA	VALOR		Desvio	COEFICIENTE			DF[(b)]
			MÍNIMO	MÁXIMO	Padrão	Variação (%)	CURTOSE	ASSIMETRIA	
					Atributo da planta				
PG	2,594	2,601	0,955	4,197	0,618	23,8	-0,060	-0,028	NO
					Densidade do solo				
DS1	1,421	1,430	1,206	1,601	0,071	5,0	0,307	-0,371	NO
DS2	1,437	1,438	1,277	1,570	0,061	4,2	-0,168	-0,235	NO
DS3	1,384	1,392	1,202	1,534	0,066	4,7	-0,231	-0,176	NO
DS4	1,311	1,303	1,124	1,515	0,075	5,7	0,365	0,414	NO
					Umidade gravimétrica				
UG1	0,198	0,198	0,157	0,251	0,019	9,7	-0,322	0,066	NO
UG2	0,211	0,209	0,177	0,269	0,018	8,7	-0,142	0,347	NO
UG3	0,216	0,214	0,165	0,277	0,021	9,7	0,016	0,453	NO
UG4	0,236	0,234	0,175	0,284	0,021	8,9	-0,369	-0,057	NO
					Umidade volumétrica				
UV1	0,281	0,280	0,221	0,349	0,028	9,9	-0,526	0,221	NO
UV2	0,303	0,303	0,240	0,372	0,026	8,5	-0,008	-0,159	NO
UV3	0,298	0,298	0,217	0,389	0,028	9,4	0,370	0,137	NO
UV4	0,308	0,305	0,213	0,364	0,028	9,2	-0,041	-0,243	NO
					Resistência do solo à penetração				
l-RP1[(c)]	3,243	3,251	1,288	6,412	0,148	28,9	0,192	-0,423	LN
RP2	3,459	3,433	2,094	5,107	0,620	17,9	0,183	0,287	NO
RP3	2,885	2,802	1,919	3,983	0,435	15,1	-0,198	0,423	NO
l-RP4[(c)]	2,399	2,350	1,514	3,475	0,066	17,3	-0,156	0,064	LN

(a) PG = produtividade de grãos (t ha^{-1}); DS, UG, UV e RP, de 1 a 4, são respectivamente a densidade do solo (kg dm^{-3}), umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), umidade volumétrica (m^3 m^{-3}) e a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); (b) DF = distribuição de freqüência, sendo NO e LN, respectivamente, distribuições de frequência normal e lognormal, e (c) valores x* da média, mediana, mínimo e máximo retrotransformados por x* = 10 log x.

O valor de 2,594 t ha^{-1} (Tabela 1), constatado para a produtividade média de grãos (PG), atende aos valores médios brasileiros, entre 0,720 e 3,500 t ha^{-1}, conforme Fahl et al. (1998) e Conab (2006). A produtividade do feijão, em função da variabilidade espacial de atributos físicos do solo, ficou estabelecida entre os dados obtidos por Gonçalves et al. (1998), Freddi et al. (2005), Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e Kitamura et al. (2007), os quais variaram entre 1,679-2,667 t ha^{-1}. Já os valores médios da densidade do solo variaram de 1,437 kg dm^{-3} (DS2) a 1,311 kg dm^{-3} (DS4), seguindo a mesma tendência obtida para a resistência mecânica do solo à penetração, em relação ao aumento em profundidade do solo, indicando que a camada de maior compactação é a de 0,10-0,20 m. Tal fato discordou dos trabalhos de Carvalho et al. (1999), Grego e Vieira (2005) e Melo Filho et al. (2006), que encontraram gradiente decrescente para a densidade do solo em profundidade. Os valores de DS, para todas as camadas, ficaram acima da faixa de variação encontrada em solos argilosos, relatada entre 1,00-1,25 kg dm^{-3} (KIEHL, 1979; CAMARGO; ALLEONI, 1997).

A umidade gravimétrica apresentou valores entre 0,236 kg kg^{-1} (UG4) e 0,198 kg kg^{-1} (UG1), seguindo comportamento linear positivo, em relação à profundidade do solo, indicando que a camada com a maior umidade foi a de 0,30-0,40 m (Tabela 1). Os valores médios da resistência mecânica do solo à penetração ficaram entre 3,459 MPa (RP2) e 2,399 MPa (*l*-RP4). Tal amplitude encontrada para os dados de RP também foi observada nos trabalhos de Gonçalves et al. (1998) e Freddi et al. (2005), cujos valores variaram de 0,50 a 3,90 MPa. Mahl et al. (2008) encontraram valores que variaram entre 2,54 e 3,03 MPa num NITOSSOLO VERMELHO sob plantio direto. Assim, de acordo com a classificação estabelecida por Arshad et al. (1996), os valores médios verificados no presente trabalho enquadraram-se na faixa de alta resistência. Os valores de umidade volumétrica variaram entre 0,308 m^3 m^{-3} (UV4) e 0,281 m^3 m^{-3} (UV1), indicando que o solo, no momento da coleta dos dados de RP, encontrava-se friável. Desse modo, os elevados valores de RP obtidos convergem de forma a sugerir que o solo abrangido pela malha de coleta de dados encontrava-se compactado.

As correlações lineares entre a PG e os atributos do solo foram todas baixas, fato justificável pelo elevado número de observações (n=135) (Tabela 2). As de maiores correlações foram estabelecidas para os pares PG x *l*-RP1 (r = -0,303**) e PG x DS1 (r = -0,190**), cujas equações de regressão linear simples foram as seguintes:

$$PG = 2{,}142 \,.\, l\text{-}RP1^{-2{,}214.10^{-1}**} \quad (r = 0{,}310;\ p < 0{,}01) \quad (4)$$

$$PG = 3{,}535 \,.\, 10^3 \,.\, DS1^{-9{,}726.10^{-1}**} \quad (r = 0{,}190;\ p < 0{,}01) \quad (5)$$

Portanto, uma vez que ambas denotaram variação inversa entre causa e efeito, constatou-se, com probabilidade de 9,6%, que com a diminuição

de um milésimo, tanto no valor da DS1 quanto da *l*-RP1, houve aumento médio da PG da ordem de 1,5 kg ha^{-1}. Assim, discordam dos dados de Santos et al. (2005), que observaram correlação diretamente proporcional entre a produtividade de feijão e a resistência mecânica do solo à penetração. Foi obtida, também, a seguinte equação de regressão linear múltipla entre a PG e os atributos do solo:

$$PG = 6{,}870 - 2{,}127.10^{\star}.UG4 + 1{,}115.10^{\star}.UV4 - 8{,}701.10^{-1\star}.l\text{-RP1} \quad (r^2 = 0{,}253;\ p < 0{,}01) \quad (6)$$

em que: PG representou a produtividade de grãos de feijão (t ha^{-1}), *l*-RP1 foi o logaritmo decimal da resistência à penetração na camada de 0-0,10 m, DS1 foi a densidade do solo na camada de 0-0,10 m e a UG4 e a UV4 foram, respectivamente, as umidades gravimétrica e volumétrica na camada de 0,30-0,40 m.

Tabela 2. Matriz de correlação linear simples entre a produtividade de grãos de feijão e atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria (Estado de Mato Grosso do Sul).

Atributo [a]	Coeficiente de correlação[b]															
	PG	DS1	*DS2*	*DS3*	*DS4*	*UG1*	*UG2*	*UG3*	*UG4*	UV1	UV2	UV3	UV4	*l*-RP1	RP2	RP3
DS1	-0,190**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS2	0,032^{ns}	0,347**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS3	0,146**	0,138*	0,389**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS4	0,154**	0,129*	0,296**	0,587**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG1	0,172**	-0,230**	-0,163**	-0,114^{ns}	-0,064^{ns}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG2	0,069^{ns}	-0,225**	-0,283**	-0,164**	-0,103^{ns}	0,844**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG3	-0,070^{ns}	-0,110^{ns}	-0,244**	-0,204**	-0,206**	0,714**	0,809**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG4	-0,111^{ns}	-0,160**	-0,299**	-0,341**	-0,282**	0,615**	0,737**	0,772**	-	-	-	-	-	-	-	-
UV1	0,078^{ns}	0,275**	0,017^{ns}	-0,038^{ns}	0,004^{ns}	0,871**	0,718**	0,646**	0,523**	-	-	-	-	-	-	-
UV2	0,084^{ns}	-0,053^{ns}	0,197**	0,025^{ns}	0,044^{ns}	0,783**	0,884**	0,707**	0,604**	0,747**	-	-	-	-	-	-
UV3	0,041^{ns}	-0,069^{ns}	-0,090^{ns}	0,245**	0,069^{ns}	0,678**	0,752**	0,855**	0,624**	0,635**	0,727**	-	-	-	-	-
UV4	0,026^{ns}	-0,059^{ns}	-0,093^{ns}	0,018^{ns}	0,339**	0,519**	0,610**	0,592**	0,759**	0,482**	0,578**	0,610**	-	-	-	-
l-RP1	-0,303**	0,136*	-0,006^{ns}	-0,024^{ns}	-0,082^{ns}	-0,469**	-0,264**	-0,123*	-0,025^{ns}	-0,394**	-0,270**	-0,140**	-0,077^{ns}	-	-	-
RP2	-0,055^{ns}	0,051^{ns}	0,056^{ns}	-0,093^{ns}	-0,106^{ns}	-0,463**	-0,354**	-0,200**	-0,056^{ns}	-0,434**	-0,337**	-0,216**	-0,124*	0,470**	-	-
RP3	0,141**	0,032^{ns}	0,176**	0,175**	0,185**	-0,249**	-0,222**	-0,229**	-0,154**	-0,230**	-0,143**	-0,134*	-0,063^{ns}	0,191**	0,578**	-
l-RP4	0,163**	-0,120^{ns}	0,137*	0,266**	0,364**	-0,165**	-0,204**	-0,321**	-0,322**	-0,225**	-0,143**	-0,169**	-0,134*	0,039^{ns}	0,274**	0,669**

(a) PG = produtividade de grãos (t ha^{-1}); DS, UG, UV e RP, de 1 a 4, são respectivamente a densidade do solo (kg dm^{-3}), umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), umidade volumétrica (m^3 m^{-3}) e a resistência do solo à penetração (MPa), nas respectivas profundidades; (b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%, e ^{ns} não significativo.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para a produtividade de grãos de feijão e para atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria (Estado de Mato Grosso do Sul).

Atributo[a]	Parâmetros								
	Modelo[b]	Efeito Pepita (C_0)	Patamar (C_0+C)	Variância Estrutural (C)	Alcance (A_0) (m)	r^2	SQR[c]	ADE[d]	Classe de dependência espacial
Atributo da planta									
PG	esf	9,070.10^{-2}	2,294.10^{-1}	1,387.10^{-1}	17,8	0,859	1,603.10^{-3}	60,5	média
DENSIDADE DO SOLO									
DS1	esf	5,100.10^{-4}	3,750.10^{-3}	3,240.10^{-3}	29,9	0,907	5,865.10^{-7}	86,4	alta
DS2	epp	3,766.10^{-3}	3,766.10^{-3}	-	-	-	-	-	-
DS3	gau	3,300.10^{-3}	4,300.10^{-3}	1,000.10^{-3}	39,8	0,721	1,788.10^{-7}	23,3	baixa
DS4	exp	6,800.10^{-4}	4,250.10^{-3}	3,570.10^{-3}	35,4	0,664	4,423.10^{-6}	84,0	alta
Umidade gravimétrica									
r-UG1[e]	epp	2,400.10^{-4}	2,400.10^{-4}	-	-	-	-	-	-
r-UG2[e]	exp	1,300.10^{-5}	1,560.10^{-4}	1,430.10^{-4}	36,3	0,368	4,037.10^{-8}	91,6	alta
r-UG3[e]	esf	1,000.10^{-6}	1,870.10^{-4}	1,860.10^{-4}	13,9	0,177	8,680.10^{-8}	99,6	alta
r-UG4[e]	esf	1,000.10^{-6}	1,120.10^{-4}	1,119.10^{-4}	17,1	0,410	6,865.10^{-9}	99,2	alta
Umidade volumétrica									
r-UV1[e]	gau	6,900.10^{-5}	2,740.10^{-4}	2,050.10^{-4}	23,7	0,694	1,463.10^{-8}	69,4	média
r-UV2[e]	exp	5,000.10^{-6}	2,920.10^{-4}	2,870.10^{-4}	33,9	0,448	5,773.10^{-8}	98,3	alta
r-UV3[e]	exp	3,200.10^{-5}	2,260.10^{-4}	1,940.10^{-4}	22,8	0,488	2,527.10^{-8}	85,8	alta
r-UV4[e]	esf	6,900.10^{-5}	3,250.10^{-4}	2,560.10^{-4}	14,7	0,517	1,564.10^{-8}	78,8	alta
Resistência mecânica do solo à penetração									
l-RP1[e]	esf	1,740.10^{-3}	1,258.10^{-2}	1,084.10^{-2}	15,2	0,493	3,661.10^{-5}	86,2	alta
RP2	epp	3,872.10^{-1}	3,872.10^{-1}	-	-	-	-	-	-
RP3	epp	1,881.10^{-1}	1,881.10^{-1}	-	-	-	-	-	-
l-RP4[e]	gau	1,500.10^{-3}	3,152.10^{-3}	1,652.10^{-3}	24,8	0,732	6,006.10^{-7}	52,4	média

(a) PG = produtividade de grãos (t ha^{-1}); DS, UG, UV e RP, de 1 a 4, são respectivamente a densidade do solo (kg dm^{-3}), umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), umidade volumétrica (m^3 m^{-3}) e a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); (b) exp = exponencial, gau.= gaussiano, esf.= esférico e epp. = efeito pepita puro; (c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; [d] ADE = avaliador da dependência espacial; [e] atributos precedidos de "*l*" e "*r*" tiveram respectivamente valores representados pelos logaritmos decimais e pelos resíduos. Das correlações estabelecidas, exclusivamente, entre os atributos do solo, foi observada uma variação inversamente proporcional entre causa e efeito para os pares DS x UG, RP x UG e RP x UV, cujos coeficientes de correlação, estabelecidos nas mesmas profundidades do solo, variaram de -0,134 (RP3 x UV3) a -0,469 (*l*-RP1 x UG1) (Tabela 2). As correlações entre RP x UG concordaram e discordaram de Santos et al. (2005) e de Carvalho et al. (2006), respectivamente. Ainda, foi observada uma correlação diretamente proporcional de causa e efeito entre os pares DS x UV, DS x RP e UG x UV, cujos coeficientes de correlação, também estabelecidos exclusivamente nas mesmas profundidades, variaram de 0,136 (DS1 x *l*-RP1) a 0,884 (UV2 x UG2).

A análise geoestatística evidenciou que PG, DS1, DS3, DS4, *r*-UG2, *r*-UG3, *r*-UG4, *r*-UV1, *r*-UV2, *r*-UV3, *r*-UV4, *l*-RP1 e *l*-RP4 apresentaram dependência espacial, ao passo que DS2, *r*-UG1, RP2 e RP3 apresentaram efeito pepita puro (Tabela 3). Assim, os valores da produtividade de grãos e os atributos do solo indicaram que a distribuição no espaço não foi aleatória, uma vez que suas classes de dependência espacial variaram de 23,3% (baixa para a DS3) a 99,6% (alta para a *r*-UG3). Foi constatado que 60,5% da variação total da produtividade de grãos foram explicados pela dependência espacial. Por outro lado, o efeito do erro atribuído ao acaso, referente ao efeito pepita, foi de 39,5%, concordando com os resultados obtidos por Gonçalves et al. (1998), Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e Kitamura et al. (2007), nos quais variou entre 20,0 e 44,1%. Os dois melhores semivariogramas ajustados foram para os atributos DS1 e PG, cujos coeficientes de determinação espacial (r^2) foram, respectivamente, de 0,907 e 0,859 (Tabela 3). Para PG, o coeficiente de determinação espacial ficou em consonância com aqueles obtidos por Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006) e Kitamura et al. (2007), nos quais variou entre 0,798 e 0,888. Contudo, com relação à DS1 (0,907), o referido coeficiente foi superior ao obtido por Carvalho et al. (2003), ou seja, de 0,744.

O alcance da dependência espacial dos atributos variou de 39,8 m (DS3) a 13,9 m (*r*-UG3) (Tabela 3). O alcance da PG foi de 17,8 m e atende aos valores encontrados na literatura para malhas geoestatísticas de magnitudes semelhantes (FREDDI et al., 2005; SANTOS et al., 2005; CARVALHO et al., 2006; KITAMURA et al., 2007), Já com relação ao alcance dos atributos exclusivamente do solo, os valores observados também ficaram em consonância com os observados nos trabalhos de Carvalho et al. (2003), Santos et al. (2005), Carvalho et al. (2006), os quais variaram entre 2,2-67,1 m.

A análise dos mapas de krigagem de todos os atributos estudados revelou, exclusivamente com relação aos atributos PG, DS1 e *r*-UV1 (Figuras 1a, b e c), elevada semelhança inversamente proporcional entre eles. Assim, em virtude da análise espacial dos mapas, ficou definido que, para suas leituras, as direções norte-sul foram estabelecidas sob o eixo cartesiano y (de cima para baixo) e as direções leste-oeste sob o eixo cartesiano x (da direita para a esquerda). Portanto, nas regiões Sul, Sudoeste e Sudeste, tanto da DS1 (Figura 1b) quanto da *r*-UV1 (Figura 1c), onde seus valores foram os menores, respectivamente, 1,28-1,43 kg dm^{-3} e 0,221-0,276 m^3 m^{-3}, a produtividade de grãos (Figura 1a) assumiu os maiores valores (2,627-3,211 t ha^{-1}). Por outro lado, nas regiões Norte, Nordeste e Noroeste da DS1 e da *r*-UV1, onde seus valores foram os maiores, respectivamente, 1,43-1,50 kg dm^{-3} e 0,276-0,331 m^3 m^{-3}, a produtividade de grãos assumiu os menores valores (2,043-2,627 t ha^{-1}). Portanto, verificou-se semelhança com os dados de Santos et al. (2005) que, trabalhando com resistência mecânica do solo à penetração, observaram concordância desses atributos com a produtividade de feijão.

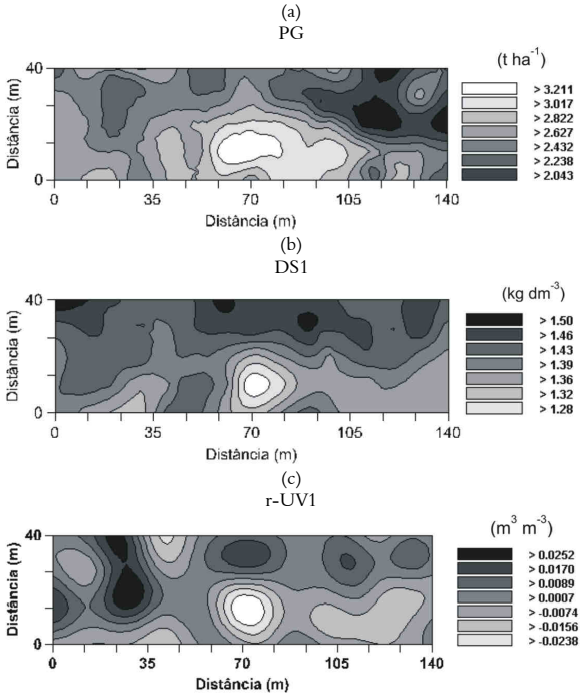

Figura 1. Mapas de krigagens da produtividade de feijão (PG) e de alguns atributos físicos (DS1 e r-UV1) de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria (Estado de Mato Grosso do Sul).

Na Tabela 4 e na Figura 2, as duas cokrigagens que apresentaram os parâmetros mais satisfatórios, sobretudo por apresentarem exclusivamente a dispersão dos *lags* no quarto quadrante da função de ajuste (Figuras 2a e c), foram a PG = f (*r*-UV1) e a PG = f (DS1), ficando em consonância com os resultados das cokrigagens apresentados por Lima et al. (2007). Os coeficientes de determinação espacial foram de 0,734 e 0,665, respectivamente, para a PG = f (*r*-UV1) e a PG = f (DS1), com alcances de 22,7 e 29,1 m. Esse fato corroborou o que havia sido previamente apresentado na Figura 1. Portanto, para as condições do presente trabalho, pode-se estimar a distribuição espacial da PG, com probabilidade de acerto variando entre 73,4 e 66,5%, a partir dos de *r*-UV1 e de DS1.

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas cruzados da produtividade de grãos de feijão em função de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria (Estado de Mato Grosso do Sul).

Atributo[a]	Parâmetros								
	Modelo[b]	Efeito Pepita (C_0)	Patamar (C_0+C)	Variância Estrutural (C)	Alcance (m) (A_0)	r^2	SQR[c]	ADE[d]	Classe de dependência espacial
PG=f(DS1)	gau	$-2{,}000.10^{-5}$	$-1{,}414.10^{-2}$	$-1{,}421.10^{-2}$	29,1	0,665	$1{,}569.10^{-4}$	99,9	alta
PG=f(DS3)	gau	$1{,}000.10^{-5}$	$3{,}900.10^{-3}$	$3{,}890.10^{-3}$	11,8	0,126	$1{,}031.10^{-4}$	99,7	alta
PG=f(*r*-UG3)[c]	gau	$-1{,}000.10^{-6}$	$-4{,}020.10^{-4}$	$-4{,}010.10^{-4}$	46,2	0,289	$4{,}558.10^{-6}$	99,8	alta
PG=f(*r*-UV1)[c]	gau	$-1{,}000.10^{-6}$	$-2{,}022.10^{-3}$	$-2{,}021.10^{-3}$	22,7	0,734	$2{,}375.10^{-6}$	99,9	alta
PG=f(*r*-UV2)[c]	gau	$-1{,}000.10^{-6}$	$-8{,}420.10^{-4}$	$-8{,}410.10^{-4}$	35,3	0,599	$8{,}774.10^{-6}$	99,9	alta
PG=f(*r*-UV3)[c]	esf	$-9{,}000.10^{-6}$	$-6{,}380.10^{-4}$	$-6{,}290.10^{-4}$	36,4	0,105	$4{,}657.10^{-6}$	98,6	alta
PG=f(*l*-RP1)[c]	gau	$-1{,}000.10^{-5}$	$-1{,}232.10^{-2}$	$-1{,}231.10^{-2}$	33,8	0,560	$5{,}806.10^{-4}$	99,9	alta
PG=f(*l*-RP4)[c]	esf	$1{,}700.10^{-4}$	$4{,}400.10^{-3}$	$4{,}230.10^{-3}$	57,3	0,320	$5{,}819.10^{-5}$	96,1	alta

(a) PG = produtividade de grãos (t ha^{-1}); DS, UG, UV e RP, de 1 a 4, são respectivamente a densidade do solo (kg dm^{-3}), umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), umidade volumétrica (m^3 m^{-3}) e a resistência mecânica à penetração (MPa); (b) exp = exponencial, gau.= gaussiano, esf.= esférico e epp. = efeito pepita puro; (c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; (d) ADE = avaliador da dependência espacial; (e) atributos precedidos de "*l*" e "*r*" tiveram respectivamente valores representados pelos logaritmos decimais e pelos resíduos.

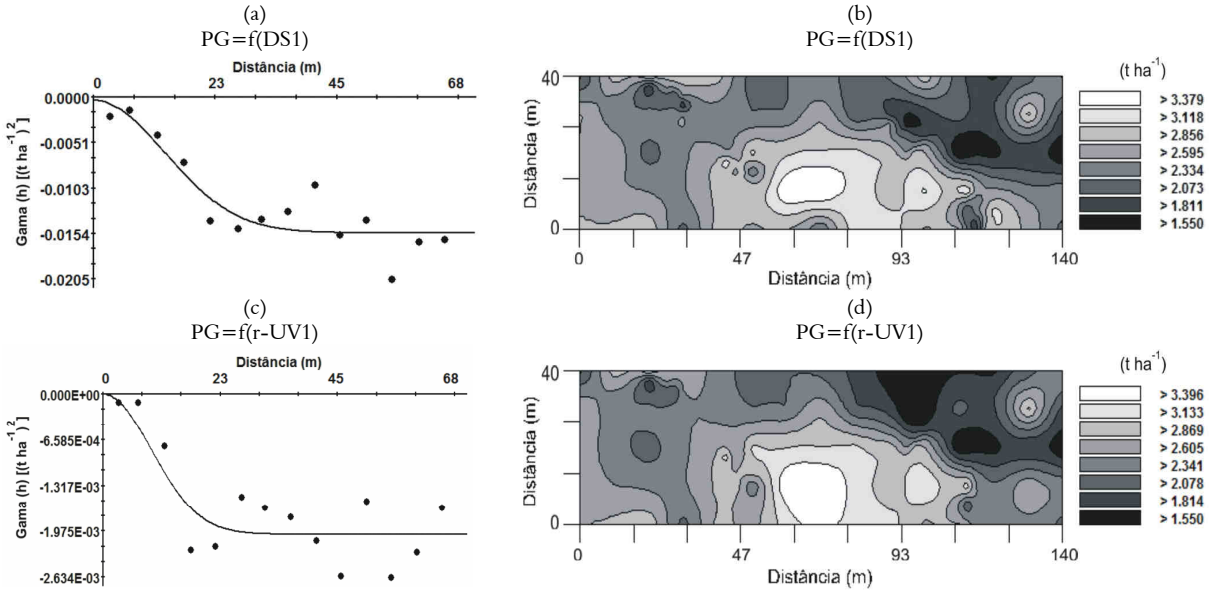

Figura 2. Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem entre a produtividade do feijão com atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico de Selvíria (Estado de Mato Grosso do Sul).

Em virtude dos dados terem indicado que: a) a PG apresentou correlação inversa e significativa com a DS1 (Tabela 2; Equação 4); b) a PG e a DS1 apresentaram ótimos ajustes semivariográficos (Tabela 3); c) a DS1 representou excelente variável secundária quando cokrigada com a PG (Tabela 4, Figuras 2a e b), é que se evidenciou o atributo DS1, entre os demais, como indicador da qualidade física do solo da área estudada, quando destinado a estimar a produtividade de grãos de feijão para as condições de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul.

Conclusão

Ainda que tenha sido baixa, a correlação linear entre a produtividade de grãos de feijão e a densidade do solo, em função do elevado número de observações, foi altamente significativa.

Espacialmente, a produtividade de grãos de feijão variou significativamente e de forma inversamente proporcional à densidade do solo.

A densidade, avaliada na camada superficial do solo, apresentou-se como indicador da qualidade física do solo estudado de Selvíria, quando destinado à produtividade de grãos de feijão.

Referências

ARSHAD, M. A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Org.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141. (SSSA Special publication, 49).

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas.** Piracicaba: Esalq, 1997.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 257-265, 1999.

CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenhara Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 765-771, 2006.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 27, n. 4, p. 675-703, 2003.

CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab. gov.br>. Acesso em: 8 jun. 2006.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **Geostatistical software library and user's guide, GSLIB**. New York: Oxford University Press, 1997.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006.

FAHL, J. I; CAMARGO, M. B. P.; PIZZINATTO, M. A; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T.; De MARIA, I. C.; FURLANI, A. M. C. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6 ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1998. (Boletim, 200).

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 1, p. 61-67, 2005.

GONÇALVES, A. C. C.; MATA, J. D. V.; VIEIRA, S. R.; FOLEGATII, M. V. Variabilidade espacial de produtividade e de resistência à penetração em área irrigada sob dois sistemas de preparo. In: GONÇALVES, A. C. C.; MATA, J. D. V.; VIEIRA, S. R.; FOLEGATII, M. V. **Avances em el manejo del suelo y agua en la ingeniería rural latinoamericana**. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 1998. p. 113-119.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

GS+: **Geostatistics for environmental sciences**. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta.** Piracicaba: Agronômica Ceres, 1979.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 31, n. 2, p. 361-369, 2007.

LIMA, C. G. R; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 31, n. 2, p. 1233-1244, 2007.

MAHL, D.; SILVA, R. B.; GAMERO, C. A.; SILVA, P. R. A. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, supl., p. 741-747, 2008.

MELO FILHO, J. F.; OLIVEIRA, A. S.; LOPES, L. C.; VELLAME, L. M. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo Amarelo coeso dos tabuleiros costeiros da Bahia. **Ciência Agrotecnologia**, v. 30, n. 2, p. 199-205, 2006.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANAS, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 25, n. 3, p. 521-529, 2001.

SANTOS, P. A.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; KITAMURA, A. E.; FREITAG. E. E.; VANZELA, L. S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 29, n. 2, p. 287-295, 2005.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS system for elementary statistical analysis**. 2 ed. Cary: SAS, 1997.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysys of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.

SILVA, V. R.; REICHERDT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um LATOSSOLO VERMELHO-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

Received on July 11, 2007.
Accepted on April 4, 2008.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.