



Correlação espacial e temporal de atributos físicos do solo com a produtividade do feijão em Chapadão do Sul - MS

Spatial and temporal correlation of soil physical attributes with common beans yield in Chapadão do Sul – MS

Rafael Montanari¹, Pedro Luiz Nagel², Aluísio Pereira da Luz², Evelize Nayara Santana da Silva², Iurhy da Silva Rezende², Lidiane Vieira da Silva², Flávia Cristina Machado², Cassiano Garcia Roque³

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Passeio Monção, 226, Zona Norte, CEP: 15385-000, Ilha Solteira, SP. E-mail: montanari@agr.feis.unesp.br

² Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Faculdade de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Aquidauana, MS

³ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Faculdade de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Chapadão do Sul, MS

Recebido em: 18/03/2013

Aceito em: 19/06/2013

Resumo. Em virtude dos potenciais produtivos poderem ser limitados pelas condições físicas do solo. Realizou-se um experimento com o objetivo de correlacionar a variabilidade da produção de grãos de feijão (PRG) por meio da seleção de atributos físicos do solo. O estudo foi desenvolvido na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campus de Chapadão do Sul em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional. Demarcou-se uma área de 2.500 m² com 121 pontos amostrais dispostos em malha regular de 5 x 5 m. Foram coletadas amostras indeformadas para caracterização da densidade do solo (DS), porosidade total (PT), resistência à penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), umidade volumétrica (UV) e densidade de partículas (DP) nas profundidades de 0,0-0,10 m (1), 0,10-0,20 m (2), 0,20-0,30 m (3). A correlação linear entre a produtividade de grãos de feijão com os atributos do solo estudados foi baixa devido ao grande número de observações. Houve variabilidade temporal dos atributos do solo e da planta entre as safras de 2010/11 e 2011/12, confirmado pela comparação de média pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A PRG foi maior na safra de 2011/12, mesmo apresentando maior densidade do solo (DS) e resistência à penetração (RP). Já, ao descrever a variabilidade espacial, os atributos tiveram padrões bem definidos, com alcances da dependência espacial entre 4,0 e 39,0 m.

Palavras-chave. Variabilidade espacial, preparo convencional, regressão linear múltipla, *Phaseolus vulgaris* L.

Abstract. Regardless of the productive potential may be limited by the physical conditions of the soil. An experiment was done in order to correlate the variability of common beans production (PRG) through the selection of soil physical attributes. The study was carried out in an Oxisol soil under conventional tillage at the Federal University of South of Mato Grosso (UFMS), in a Chapadão do Sul city. An area of 2,500 m² was choose with 121 sampling points arranged in a regular grid of 5 x 5 m. Soil sampling were collected to characterize the bulk density (BD), total porosity (TP), penetration resistance (PR), gravimetric moisture (UG), soil moisture (UV) and particle density (PD) at depths of 0.0 to 0.10 m (1), 0.10 to 0.20 m (2), 0.20 to 0.30 m (3). The linear correlation between grain yield pinto beans with soil properties studied was low due to the large number of observations. There was temporal variability of soil properties and plant between 2010/11 and 2011/12 crops, confirmed by comparing average by Tukey test at 5% significance level. The PRG was higher in the harvest of 2011/12, even with higher bulk density (DS) and penetration resistance (PR). However, at the spatial variability description, the attributes had well-defined standards, with ranges of spatial dependence between 4.0m and 39.0m.

Keywords. Spatial variability, conventional tillage, linear multiple regression, *Phaseolus vulgaris* L.



Introdução

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos alimentos mais importantes na dieta básica do brasileiro, por ser um alimento proteico. No Brasil, em 2011, foram cultivados 3,6 milhões de hectares, com uma produção registrada em 3,5 milhões de toneladas, com produtividade média de grãos de 951 kg ha⁻¹ (IBGE, 2011). No entanto, a produtividade média brasileira continua sendo muito baixa, já que as cultivares atuais apresenta potencial produtivo superiores a 3.400 kg ha⁻¹ (Stone, 2013).

E grande parte das limitações do potencial produtivo é influenciada diretamente pelas condições dos atributos físicos do solo. Fatores estes que fogem de uma condição favorável para o desenvolvimento do sistema radicular, comprovado por Corá et al. (2004), Reichardt & Timm (2004), Montanari et al. (2013) e Campos et al. (2013) que descreveram que o manejo do solo propicia alterações em sua variabilidade natural, principalmente nas camadas superficiais.

Entre os atributos com influência direta ao desenvolvimento do sistema radicular, destaca-se a resistência à penetração e a densidade do solo. Para Freddi et al. (2006) a resistência do solo à penetração é eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade do solo. A densidade do solo é o atributo que mais interfere no desenvolvimento radicular e o aumento nos seus valores ocorre devido à compactação resultante do tráfego de máquinas, veículos e implementos.

Além disso, os solos agricultáveis do Estado de Mato Grosso do Sul têm passado por grandes problemas de degradação física e química devido ao intensivo uso, à erosão, à perda da fertilidade, à redução do conteúdo de matéria orgânica e principalmente, à formação de camadas compactadas. Essa compactação gera substancial alteração da sua estrutura, desencadeando a reorganização das partículas e de seus agregados, podendo limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, as trocas gasosas e o crescimento do sistema radicular, resultando no decréscimo da produtividade das culturas (Roque et al., 2008).

Para o aumento da produtividade o processo de modernização e racionalização da agricultura constitui-se em um fator de grande importância. Segundo Dalchiavon et al. (2011) o custo crescente dos insumos agrícolas exige, cada vez mais, a adoção de técnicas de cultivos adequadas na produção das culturas anuais. Desta forma, há

tendência de integração de diversas fontes de dados, a fim de melhor gerenciar a produção agrícola, ocorrida em virtude do reconhecimento cada vez maior de que as culturas e os solos não devem ser manejados individualmente e de forma homogênea.

Os avanços tecnológicos da agricultura têm permitido estudar a produção das culturas em função da variabilidade espacial. A interferência dos fatores pode ser correlacionada por meio de uma série de dados, admitindo variação espacial e temporal de propriedades locais que afetam o rendimento das culturas, fazendo uma melhor exploração dos fatores de produção, com o objetivo de otimizar o aproveitamento de recursos e diminuir custos com o manejo regionalizado (Dalchiavon et al., 2011).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi selecionar entre os atributos do solo avaliados, aquele com a melhor correlação, linear e espacial, para explicar a variabilidade da produtividade.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no ano agrícola de 2011/2012, em área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS/CPCS), Campus de Chapadão do Sul (MS), localizada na latitude 18°41'33" S e longitude 52°40'45" W, com altitude de 800 m. O clima segundo a classificação de Köppen é tropical úmido (Aw) com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação média anual local de 1.300 mm e temperatura média de 23,7°C. O solo no local do experimento foi classificado por Demattê (1980) e reclassificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), como Latossolo Vermelho Distrófico típico muito argiloso, a moderado, hipodistrófico, álico, caulínico, férrico, muito profundo, moderadamente ácido (Typic Acrustox). Sua granulometria, analisada da superfície até 0,30 m, é de 620 g kg⁻¹ de argila, 100 g kg⁻¹ de silte, 60 g kg⁻¹ de areia grossa e 220 g kg⁻¹ de areia fina, o que lhe confere a textura muito argilosa.

A planta-teste utilizada foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Pérola, semeado em meados de outubro de 2011 obedecendo ao espaçamento de 0,45 m e proporcionando densidade média de 16 plantas m⁻¹. Estes procedimentos foram realizados após a correção da acidez do solo, fertilização e dessecação da cultura antecessora. O cultivo anterior também foi o plantio do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Pérola.

A área experimental foi definida em um lançante entre dois terraços, georreferenciados nas



direções X e Y pelo sistema de sistema de coordenadas cartesianas para o Datum WGS84. Assim, demarcou-se uma área de 2.500 m² (50 x 50 m) que continham 121 pontos amostrais dispostos em malha regular de 5 x 5 m. Os atributos do solo e da planta foram individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral. Em cada ponto realizou a coleta de amostras de solo com estrutura indeformada nas profundidades (0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) para caracterização da resistência mecânica à penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), umidade volumétrica (UV), densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP) e porosidade total (PT). Fez-se também a amostragem para a contabilização da produtividade de grãos de feijão (PRG) através da coleta das plantas no entorno de cada ponto amostral, com área útil de 3,24 m² (1,80 x 1,80 m) em quatro linhas de semeadura. O feijão foi colhido no estádio fenológico entre R7 e R8, com uma umidade entre 13 a 15 %. Dessa forma, foram estudados 19 atributos: PRG, RP1, RP2, RP3, UG1, UG2, UG3, UV1, UV2, UV3, DS1, DS2, DS3, DP1, DP2, DP3, PT1, PT2 e PT3.

As amostras de solo, originadas de monólitos com estruturas indeformadas, foram para a DS. Desta forma, a densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, relacionada em [kg dm⁻³], enquanto a umidade gravimétrica foi determinada com balança analítica, com precisão de 0,005g, relacionada em [kg kg⁻¹] e a densidade de partícula foi determinada pelo método do álcool, também relacionada em [kg kg⁻¹]. Todas foram determinadas conforme a Embrapa (1997). A resistência à penetração (RP) foi avaliada com o penetrômetro de impactos (Stolf, 1991) e calculada segundo expressão contida em Rosa Filho et al. (2009).

Para cada atributo estudado, efetuou-se a análise descritiva clássica, com auxílio do software estatístico SAS (Schlotzhaver & Littell, 1997), em que foram calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Posteriormente, realizou-se a identificação dos *outliers*, efetuando a substituição dos seus valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha. Para testar a hipótese de normalidade, foi utilizada a estatística de Shapiro & Wilk a 5 %.

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 seus atributos independentes (solo) e a dependente (PRG), objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionaram as melhores relações entre causa e efeito. Para isso, foi utilizado o SAS, por intermédio do *stepwise*.

Isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples. Contudo, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, calcularam-se também seus semivariogramas cruzados, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, com auxílio do software GS⁺ Versão 7 (Robertson, 1998), que realiza os cálculos das semivariâncias amostrais. O semivariograma é uma representação gráfica entre a semivariância $\hat{\gamma}(h)$, representada na ordenada Y, e uma determinada distância (h), representada na abscissa X, cuja equação pode ser encontrada em Vieira et al. (1983).

Os ajustes dos semivariogramas, em função de seus modelos, foram efetuados prioritariamente pela seleção inicial de: a) menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); b) maior coeficiente de determinação (r²), e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos.

Aos casos que ocorreram interdependência espacial, o semivariograma cruzado também foi adotado para verificar a correlação espacial entre os atributos físicos avaliados no solo e a produtividade do feijoeiro, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca. Para seu cálculo, utilizou-se a expressão descrita na equação 1, segundo Vauclin et al. (1983):

$$\hat{\gamma}_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z_1(\mathbf{x}_i + h) - z_1(\mathbf{x}_i)] - [z_2(\mathbf{x}_i + h) - z_2(\mathbf{x}_i)].$$



Em que:

z_1 representa a produtividade do feijoeiro e z_2 , o atributo físico avaliado.

Para análise do alcance da dependência espacial (ADE) que permite classificar a dependência espacial em fraca ($ADE \leq 25\%$), moderada ($25\% < ADE \leq 75\%$) e forte ($ADE > 75\%$) segundo com Cambardella et al.(1994) foi utilizada a proporção dada pela equação:

$$ADE = (C_0/C+C_0) \times 100$$

Em que:

(C_0) = efeito pepita e

(C_0+C) = patamar.

Resultados e Discussão

O conjunto de dados apresentou distribuição do tipo normal para os atributos PRG, DS1, DS2, UG3, UV1, UV2, UV3, PT1, PT2, PT3, RP2 e RP3 (Tabela 1). Os demais atributos físicos do solo apresentaram distribuição de frequência do tipo tendendo a normal (DS3, UG1 e UG2) e indeterminada (RP1, DP1, DP2 e DP3). Dalchiavon et al., (2011) que analisaram um Latossolo Vermelho Distroférrico e Montanari et al., (2013) trabalhando em um Argissolo, verificaram para os mesmos atributos estudados distribuição de frequência do tipo normal. Já para os atributos cuja distribuição de frequência foi tida como indeterminada (RP1 e DP2) concordam com os resultados encontrados por Montanari et al. (2010) que avaliaram um Latossolo Vermelho Distroférrico também observaram o mesmo tipo de distribuição

Os valores do coeficiente de variação indicam que os atributos DS2, DS3, UG2, UG3, UV2, DP1, DP2 e DP3 apresentaram baixa variabilidade, segundo os critérios de classificação de Pimentel Gomes & Garcia, (2002). Neste mesmo princípio, ocorreu média variabilidade para DS1 e UG1, alta variabilidade para UV1, UV3, PT1, PT2, PT3, RP2 e RP3. Já para a RP1 e a PRG a variabilidade foi tida como muito alta. Resultados similares foram encontrados por Freddi et al. (2005), Kitamura et al. (2007), Martins et al. (2009) e Montanari et al. (2010) trabalhando em condições análogas obtiveram também alta variabilidade para a produtividade de grãos de feijão.

Considerando alguns estudos geoestatísticos que analisaram correlações entre a produtividade de grãos de feijoeiro e atributos do solo, a média de produtividade obtida no presente trabalho (2209,52 kg ha⁻¹) superou a média de produtividade brasileira que é de 951 kg ha⁻¹ para a mesma variedade (IBGE, 2011) e foi consonante com a produtividade de grãos do trabalho realizado por Montanari et al. (2010), que apresentou produtividade de 2200,9 kg ha⁻¹, em elevado nível tecnológico de produção.

Nessas mesmas condições Martins et al. (2009) também alcançaram 2594 kg ha⁻¹. Produtividade superior foi obtida com Dalchiavon et al. (2011) com 3044 kg ha⁻¹ sob semeadura direta de feijoeiro. O valores médios da umidade gravimétrica variaram entre 0,213 kg kg⁻¹ (UG1) e 0,222 kg kg⁻¹ (UG2), apresentando maior umidade na camada de 0,10-0,20 m.

Já os valores médios da densidade do solo apresentaram-se entre 1,392 kg dm⁻³ (DS1) e 1,634 kg dm⁻³ (DS3), aumentando conforme a profundidade, não seguindo a mesma tendência da resistência à penetração que obteve valores médios entre 1,017 MPa (RP1) e 2,301 MPa (RP2). Na camada superficial o valor médio foi inferior e menor do que o considerado crítico na literatura (2 MPa) (Silva, 2008; Collares et al. 2008) sem generalizar condições texturais e hídricas. Também Carvalho et al. (2006) não encontraram restrição na produtividade de grãos de feijoeiro com a resistência à penetração variando entre 1,290 e 2,870 MPa. O resultado desse atributo está em conformidade com Martins et al.(2009) no mesmo tipo de solo.

Para a densidade do solo, Grego & Vieira (2005) e Melo Filho et al. (2006) encontraram gradiente decrescente para a densidade do solo conforme a profundidade. No tocante da porosidade total, os valores médios ficaram compreendidos entre 0,347 m³ m⁻³ (PT3) e 0,442 m³ m⁻³ (PT1), o que é considerado um valor limitante em solos de textura muito argilosa, segundo Andrade e Stone (2009) que afirmam que a porosidade total ideal é entre 0,54 e 0,61 m³ m⁻³. Trabalhando com feijoeiro irrigado, Silva et al. (2008) constataram valores de porosidade total variando de 0,45 a 0,51 m³ m⁻³ que não afetaram a produtividade do feijoeiro.



Tabela 1. Análise descritiva da produtividade de grãos de feijão e de atributos físicos do solo de um Latossolo Vermelho distrófico de Chapadão do Sul, MS, safra 2011/12.

Atributo ^(a)	Medidas da estatística descritiva									
	Valores				Desvio Padrão	Coeficientes			Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Máx	Mín		Varição	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Produtividade de grãos										
PRG (kg ha ⁻¹)	2209,52	2286,4	3954,4	362,7	760,59	34,42	-0,20	-0,340	0,117	NO
Densidade do solo										
DS1 (kg dm ⁻³)	1,392	1,393	1,758	0,943	0,158	11,410	-0,046	-0,275	0,588	NO
DS2 (kg dm ⁻³)	1,559	1,569	1,835	1,241	0,108	6,989	-0,106	-0,204	0,849	NO
DS3 (kg dm ⁻³)	1,634	1,629	2,103	1,379	0,116	7,100	1,388	0,617	0,026	TN
Umidade gravimétrica										
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,213	0,212	0,291	0,150	0,030	14,280	-0,295	0,418	0,06	TN
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,222	0,22	0,296	0,173	0,019	8,730	1,485	0,355	0,032	TN
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,214	0,212	0,248	0,172	0,013	6,320	0,453	0,087	0,361	NO
Umidade volumétrica										
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,301	0,297	0,494	0,114	0,068	22,610	0,097	0,408	0,092	NO
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,345	0,341	0,433	0,253	0,031	9,1850	0,569	0,066	0,185	NO
UV3 (m ³ m ⁻³)	0,350	0,352	0,424	0,268	0,029	14,990	0,629	-0,166	0,056	NO
Porosidade total										
PT1 (%)	0,442	0,442	0,647	0,304	0,063	14,320	0,403	0,314	0,444	NO
PT2 (%)	0,378	0,378	0,542	0,206	0,056	14,820	1,046	0,284	0,085	NO
PT3 (%)	0,347	0,350	0,471	0,138	0,05	14,580	1,579	-0,586	0,387	NO
Resistência do solo à penetração										
RP1 (MPa)	1,017	0,966	2,052	0,352	0,389	38,270	-0,459	0,461	0,009	IN
RP2 (MPa)	2,301	2,260	3,519	1,498	0,394	17,160	-0,07	0,436	0,134	NO
RP3 (MPa)	2,145	2,144	3,003	1,709	0,279	13,040	-0,215	0,28	0,316	NO
Densidade de partículas										
DP1 (kg dm ⁻³)	2,495	2,50	2,667	2,326	0,061	2,480	0,693	0,01	0,003	IN
DP2 (kg dm ⁻³)	2,504	2,50	2,439	2,353	0,064	2,560	1,045	-0,477	0,0001	IN
DP3 (kg dm ⁻³)	2,508	2,50	2,666	2,353	0,056	2,250	0,513	0,088	0,0011	IN

^(a)PRG = produtividade de grãos de feijão; DS, UG, UV, PT, RP, e DP são respectivamente a densidade do solo, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, porosidade total, resistência mecânica à penetração e densidade de partículas; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo IN, TN e NO respectivamente do tipo indeterminada, tendendo a normal e normal.

A avaliação da variabilidade temporal dos atributos físicos do solo e da planta medido pelo resultado do teste F da análise da variância, para os anos de 2010/11 e 2011/12, mostrou-se significativo para a PRG, a 5% (Tabela 2). Assim, a diferença da PRG (786 kg ha⁻¹), indica que no ano de 2011/12, ainda que em condições de maior compactação, proporcionou uma maior produtividade de grãos de feijão. Quando se aplicou o teste F para os atributos do solo para os anos de 2010/11 e 2011/12, verificou-se diferença significativa para 66% dos atributos estudados. Observa-se que para o ano de

2011/12 que ocorreu um aumento da densidade do solo e da resistência à penetração e uma diminuição da porosidade total. Nesse sentido, observa-se que mesmo com este aumento da compactação do solo ocorre aumento da produtividade do feijão, devido, provavelmente, ao maior contato solo-raiz causado pelo efeito de compactação do solo, que pode neste caso, ter contribuído com a absorção de nutrientes, favorecendo, assim a produtividade agrícola. Já os atributos do solo UV2, UV3, RP2 e DP's não foram afetados pelo manejo no tempo.



Tabela 2. Análise de variância da produtividade de feijão e de atributos físicos de um Latossolo em Chapadão do Sul, MS, na safra 2010/11 e 2011/12

Atributo ^(a)	Ano		p
	2010/11	2011/12	
PRG (kg ha ⁻¹)	1423±53,4b	2209±53,4a	<0,0001
DS1 (kg dm ⁻³)	1,232±0,012b	1,401±0,012a	<0,0001
DS2 (kg dm ⁻³)	1,336±0,009b	1,550±0,009a	<0,0001
DS3 (kg dm ⁻³)	1,325±0,008b	1,634±0,008a	<0,0001
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,261±0,003b	0,232±0,003a	<0,0001
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,259±0,002b	0,222±0,002a	<0,0001
UG3 (kg kg ⁻¹)	0,254±0,002b	0,211±0,002a	<0,0001
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,350±0,005b	0,301±0,005a	<0,0001
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,346±0,003	0,346±0,003	0,985
UV3 (m ³ m ⁻³)	0,336±0,003	0,345±0,003	0,0978
PT1 (m ³ m ⁻³)	50,7±0,494b	44,2±0,494a	<0,0001
PT2 (m ³ m ⁻³)	46,9±0,446b	37,9±0,446a	<0,0001
PT3 (m ³ m ⁻³)	47,8±0,431b	34,7±0,431a	<0,0001
RP1 (MPa)	0,673±0,027b	1,017±0,027a	<0,0001
RP2 (MPa)	2,214±0,043	2,301±0,043	0,1649
RP3 (MPa)	2,700±0,040b	2,145±0,040a	<0,0001
DP1 (kg dm ⁻³)	2,500±0,010	2,499±0,010	0,8703
DP2 (kg dm ⁻³)	2,521±0,012	2,498±0,012	0,1767
DP3 (kg dm ⁻³)	2,507±0,011	2,533±0,011	0,1068

^(a)PRG = produtividade de grãos de feijão; DS, UG, UV, PT, RP e DP de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, porosidade total, resistência à penetração e densidade da partícula, coletados nas camadas do solo; ^(b)p = probabilidade, sendo <0,01, significativo a 1% e entre 0,01 e 0,05 significativo a 5%, letras diferentes na mesma linha significa que possuem diferença significativa.

As correlações lineares de Pearson entre a PRG e os atributos do solo foram baixas pelo fato do elevado número de observações (n=121). Com isso, os modelos matemáticos com pares significativos da PRG em função dos atributos do solo foram formados pela PRG = f(UG1) e PRG = f(RP2). O coeficiente de correlação para o par PRG x UG1 foi de -0,20* e para o par PRG x RP2 foi de 0,18*. Dessa forma a equação variou de forma inversa para a UG1 e direta para a RP2. Assim, para o primeiro

par que apresentou correlação negativa, pode-se inferir que com o aumento da UG1, ocorrerá uma diminuição da PRG. Já para o segundo par que apresentou correlação positiva pode-se inferir que com o aumento da RP2, ocorrerá o mesmo com a PRG.

Em função dos pares supracitados, a PRG pode ser estimada por meio das seguintes equações de regressão linear simples:

$$PRG = 7,125.10^2 \times UG1^{-6,780.10^{-1}} - (r=0,22^{p<0,02}; n=121)$$

$$PRG = 1457,6 \times RP20,4075 - (r=0,15^{p<0,04}; n=121)$$



Tabela 3. Matriz de correlação da produtividade de grãos de feijão (PRG) e dos atributos físicos do solo de um Latossolo Vermelho distrófico de Chapadão do Sul, MS, safra 2011/12.

Atributo ⁽¹⁾	Coeficientes de correlação ⁽²⁾																			
	PRG	DS1	DS2	DS3	UG1	UG2	UG3	UV1	UV2	UV3	PT1	PT2	PT3	RP1	RP2	RP3	DP1	DP2	DP3	
DS1	0,00	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS2	-0,06	0,28**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS3	-0,02	0,14	0,29**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG1	-0,20*	0,28**	0,18*	-0,07	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG2	-0,05	-0,07	-0,20*	-0,11	0,23**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG3	-0,10	0,15*	-0,07	-0,14	0,45**	0,43**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV1	-0,08	0,67**	0,28**	0,07	0,75**	0,07	0,39**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV2	-0,10	0,21**	0,47*	0,09	0,29**	0,58**	0,31	0,28	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV3	-0,02	0,27**	0,15*	0,57**	0,33**	0,26**	0,65**	0,40	0,31**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PT1	0,05	-0,91**	-0,32**	-0,19*	-0,27**	0,12	-0,10	-0,64	-0,19*	-0,26**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PT2	0,08	-0,30**	-0,84**	-0,29**	-0,12	0,22*	0,10	-0,26	-0,48**	-0,14	0,33**	1	-	-	-	-	-	-	-	-
PT3	0,04	-0,08	-0,32**	-0,93**	0,06	0,13	0,14	-0,05	-0,06	-0,55**	0,14	0,28	1	-	-	-	-	-	-	-
RP1	0,12	0,09	0,12	-0,09	-0,18*	-0,32**	-0,18*	-0,11	-0,12	-0,20*	-0,14	-0,12	0,07	1	-	-	-	-	-	-
RP2	0,18*	-0,14	0,09	0,10	-0,38**	-0,44**	-0,40**	-0,34	-0,28**	-0,25**	0,05	-0,08	-0,14	0,54**	1	-	-	-	-	-
RP3	0,12	-0,03	0,10	0,12	-0,33	-0,27**	-0,33**	-0,27	-0,15	-0,20*	-0,00	-0,09	-0,15	0,18*	0,67**	1	-	-	-	-
DP1	0,15	0,06	-0,00	-0,04	-0,05	0,03	-0,01	-0,02	0,04	-0,03	0,07	0,02	0,06	-0,07	-0,04	-0,11	1	-	-	-
DP2	0,07	-0,04	-0,06	-0,16*	-0,03	-0,04	0,12	-0,03	-0,00	-0,05	0,04	0,34**	0,10	0,13	0,07	-0,03	0,06	1	-	-
DP3	0,07	0,11	-0,10	0,01	-0,03	0,07	0,08	-0,03	0,08	0,02	-0,05	0,00	0,28**	-0,03	-0,10	-0,05	0,08	-0,16	1	-

⁽¹⁾ PRG = produtividade de grãos de feijão; DS, UG, UV, PT, RP, e DP de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, porosidade total, resistência mecânica à penetração e densidade de partículas. ⁽²⁾ ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

Por meio da análise de regressão linear múltipla, selecionou-se os atributos que melhor puderam representar a estimativa da PRG. Assim, com a técnica de seleção de atributos pelo *stepwise*, a variação da PRG pode ser explicada em função da

RP2 e da DP1 no ano de 2011/12 e em função da UV2 e DP1 em 2010/11. As equações de regressão múltipla encontrada que representam essa relação entre a produtividade de grãos (PRG) e os atributos do solo para cada ano foi:

$$PRG (2011) = -4331,3^{p<0,11} - 314,95^{p<0,07} \times RP2 + 2329,3^{p<0,02} \times DP1 - r=0,22^{p<0,02}$$

$$PRG (2010) = -1957,4^{p<0,43} - 2896,8^{p<0,05} \times UV2 + 2068,2^{p<0,03} \times DP1 - r=0,24^{p<0,03}$$

A partir da equação 5 pode-se estimar a PRG em função da RP2 e DP1, os quais são atributos de maior facilidade de coleta em relação à PRG. Assim, quando se observa os valores médios para RP2 (2,301 MPa) e DP1 (2,495 kg dm⁻³) (Tabela 1), a PRG terá um valor médio de produtividade (758 kg

ha⁻¹). Já para a equação 6 pode-se estimar a PRG em função da UV2 e DP1. Assim, quando se observa os valores médios para UV2 (0,345 m³ m⁻³) e DP1 (2,495 kg dm⁻³) (Tabela 1), a PRG terá um valor médio de produtividade (2.563 kg ha⁻¹). O mesmo método de seleção de atributos foi testada por Stone



et al. (2013) correlacionando linearmente atributos físicos, químicos e biológicos. Salienta-se que a produtividade de grãos de feijoeiro foi melhor explicada pelos agregados do solo e pela matéria orgânica. Também Dalchiavon et al. (2011)

conseguiram explicar a produtividade de grãos de feijoeiro por meio dos atributos químicos do solo incluindo a matéria orgânica do solo.

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para a produtividade de grãos de feijão e de atributos físicos do solo de um Latossolo Vermelho distrófico de Chapadão do Sul, MS, safra 2011/12

Atributo ^(a)	Modelo ^(b)	Parâmetros						
		Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (m) (A ₀)	r ²	SQR ^(c)	Alcance da dependência espacial ^(d) % ^(d)	Classe
$\gamma(h)$ simples – Atributo da planta								
PRG (kg ha ⁻¹)	exp (203)	55000	530100	9,90	0,84	1,75.10 ⁹	89,60	alta
$\gamma(h)$ simples – Atributos do solo								
DS1 (kg dm ⁻³)	exp(205)	0,01222	0,02454	13,16	0,93	3,839.10 ⁻⁶	50,20	moderada
DS2 (kg dm ⁻³)	exp(208)	0,00179	0,01528	4,91	0,66	7,715.10 ⁻⁶	88,30	alta
DS3 (kg dm ⁻³)	exp(213)	0,00134	0,01198	4,31	0,97	2,153.10 ⁻⁷	88,80	alta
UG1 (kg kg ⁻¹)	esf(220)	0,00059	0,0012	36,20	0,94	1,885.10 ⁻⁸	50,40	moderada
UG2 (kg kg ⁻¹)	esf(220)	0,00017	0,00043	24,80	0,96	1,468.10 ⁻⁹	59,40	moderada
UG3 (kg kg ⁻¹)	esf(220)	0,00013	0,0003	22,93	0,98	2,028.10 ⁻¹⁰	56,30	moderada
UV1 (m ³ m ⁻³)	esf(220)	0,00258	0,00518	39,10	0,96	1,948.10 ⁻⁷	50,10	moderada
UV2 (m ³ m ⁻³)	exp(183)	0,00013	0,00105	5,10	0,87	1,503.10 ⁻⁸	88,00	alta
UV3 (m ³ m ⁻³)	exp(220)	0,00019	0,00118	5,31	0,87	2,067.10 ⁻⁸	84,20	alta
PT1 (%)	exp(208)	0,00042	0,00391	4,07	0,87	1,310.10 ⁻⁷	89,30	alta
PT2 (%)	exp(205)	0,00139	0,00293	10,20	0,86	1,454.10 ⁻⁷	52,70	moderada
PT3 (%)	exp(220)	0,0003	0,0026	5,00	0,92	5,262.10 ⁻⁸	88,70	alta
RP1 (MPa)	epp(213)	0,1434	0,1434	-	-	-	-	-
RP2 (MPa)	esf(220)	0,0559	0,1788	22,23	0,92	5,175.10 ⁻⁴	68,70	moderada
RP3 (MPa)	exp(213)	0,0091	0,0749	12,99	0,90	3,775.10 ⁻⁵	87,90	alta
DP1 (kg dm ⁻³)	epp(220)	0,004145	0,004145	-	-	-	-	-
DP2 (kg dm ⁻³)	exp(206)	0,00025	0,00406	9,96	0,89	6,940.10 ⁻⁸	93,80	alta
DP3 (kg dm ⁻³)	epp(220)	0,00372	0,00372	-	-	-	-	-
$\gamma(h)$ cruzado – Atributo da planta x solo								
PRG = f (UV2)	exp(168)	-0,001	-2,775	33,87	0,50	3,40	100,00	alta
PRG = f (UV3)	gau(205)	-0,01	-3,318	11,60	0,37	7,21	99,70	alta
PRG = f (PT2)	gau(190)	0,01	35,080	21,82	0,52	12,90	99,70	alta
PRG = f (RP3)	gau(190)	0,01	244,300	9,14	0,29	358,00	100,0	alta
PRG = f (DP2)	exp(192)	0,74	616,600	13,5	0,06	32,00	88,0	alta

^(a)PRG = produtividade de grãos de feijão; DS, UG, UV, PT, RP e DP de 1 a 3, são respectivamente a densidade do solo, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, porosidade total, resistência à penetração e densidade da partícula, coletados nas camadas do solo; ^(b)parênteses sucedendo o modelo = número de pares no primeiro lag. exp = exponencial; epp = efeito pepita puro; gau = gaussiano e esf = esférico; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d)ADE = avaliador da dependência espacial.



Os atributos analisados em sua maioria verificou-se uma estrutura de dependência espacial pelos semivariogramas simples ajustados ao modelo esférico e exponencial, onde os ajustados ao modelo esférico foram UG1, UG2, UG3, UV1 e RP2, e ao modelo exponencial foram PRG, DS1, DS2, DS3, UV2, UV3, PT1, PT2, PT3, RP3 e DP2 (Tabela 4). Para os semivariogramas cruzado foram ajustados os modelos exponencial e gaussiano. Não foi observada a estrutura de dependência espacial nos atributos do solo (RP1, DP1 e DP3) caracterizando o que se denomina efeito pepita puro. O efeito pepita (C_0) é um parâmetro importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada (Cambardella, et al., 1994), o que significa que o alcance (A_0), para os atributos citados, é menor que o menor espaçamento entre amostras utilizado no estudo (Vieira 2000), podendo ser discutido apenas pela estatística clássica.

Os semivariogramas simples dos atributos foram bem ajustados com uma série de pares no primeiro *lag*, principalmente. O melhor ajuste foi para a UG3, com um coeficiente de determinação espacial (r^2) de 0,98, enquanto para a PRG foi de 0,84. Assim, em relação aos coeficientes de determinação (r^2) os atributos decresceram na seguinte ordem: 1)UG3 (0,98), 2)DS3 (0,97), 3)UV1 (0,96) 4)UG2 (0,96) 5)UG1 (0,94) 6)DS1 (0,93) 7)PT3 (0,92) 8)RP2 (0,92) 9)RP3 (0,90) 10)DP2 (0,89) 11)PT1 (0,87) 12)UV3 (0,87) 13)UV2 (0,87)14)PT2 (0,86) e 15)DS2 (0,66). Portanto, em vista de ter sido apresentada aleatoriamente a menor dispersão dos lags em torno do modelo exponencial ajustado, o melhor semivariograma foi o da UG3 ($r^2 = 0,98$), com ADE moderado de 56,3% e alcance de 22,93 m, diferindo dos resultados encontrados por Montanari et al. (2010), em que o UG1 foi o atributo com o melhor ajuste semivariográfico (ADE = 67,2% e $r^2 = 0,976$).

Com exceção da RP1, DP1 e DP3 que apresentaram efeito pepita puro, os coeficientes de determinação validaram o avaliador da dependência espacial (ADE) dos atributos nas classes forte e moderado. Os atributos PRG, DS2, DS3, UV2, UV3, PT1, PT3, RP3 e DP2 apresentaram avaliador da

dependência espacial de classe forte (ADE>75%). E a classe moderada foi definida para a DS1, UG1, UG2, UG3, UV1, PT2 e RP2 ($25% < ADE \leq 75%$), resultado dos ajustes para os semivariogramas simples. Para todos os pares formados nos semivariogramas cruzados houve avaliador da dependência espacial de classe forte.

O melhor modelo ajustado foi o esférico para a UG3. Também ajustaram a esse modelo os atributos UG1, UG2, UV1 e RP2, concordando com os resultados de vários trabalhos em ciência do solo que indicam o modelo esférico como de maior ocorrência para os atributos do solo (Carvalho et al., 2002; Souza et al., 2004; Grego & Vieira, 2005; Souza et al. 2010). Para a PRG foi ajustado o modelo exponencial com alcance de 9,9 m, diferindo de Martins et al. (2009). Os autores fizeram ajuste semivariográfico com modelo esférico para a produtividade do feijão cultivado em sistema de plantio direto em Latossolo Vermelho distrófico e alcance de 17,8 m. Também trabalhando em Latossolo Vermelho distrófico, Montanari et al. (2010) encontraram alcance próximo para a PRG com 10,7 m.

Para os outros atributos, os maiores alcances foram encontrados na UV1, UG1 e para a PRG = f (UV2) com os alcances de 39,10, 36,20 e 33,87 m e os menores para a DS2, DS3 e PT1 com 4,91, 4,31 e 4,07 m. Esse resultado leva à sugestão de que no auxílio a trabalhos futuros, que utilizem malhas geoestatísticas e distância entre pontos iguais aos do presente, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, em geral, deverão estar compreendidos entre 4,07 m e 39,10 m, por representarem a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si.

Na comparação inicial dos mapas de krigagem simples dos atributos do solo e da planta, os valores da interpolação no mapa de isolinhas de superfície apontaram elevada semelhança espacial com relação aos atributos UV2, UV3, PT2, RP3 e DP2, com a PRG (Figura 1).

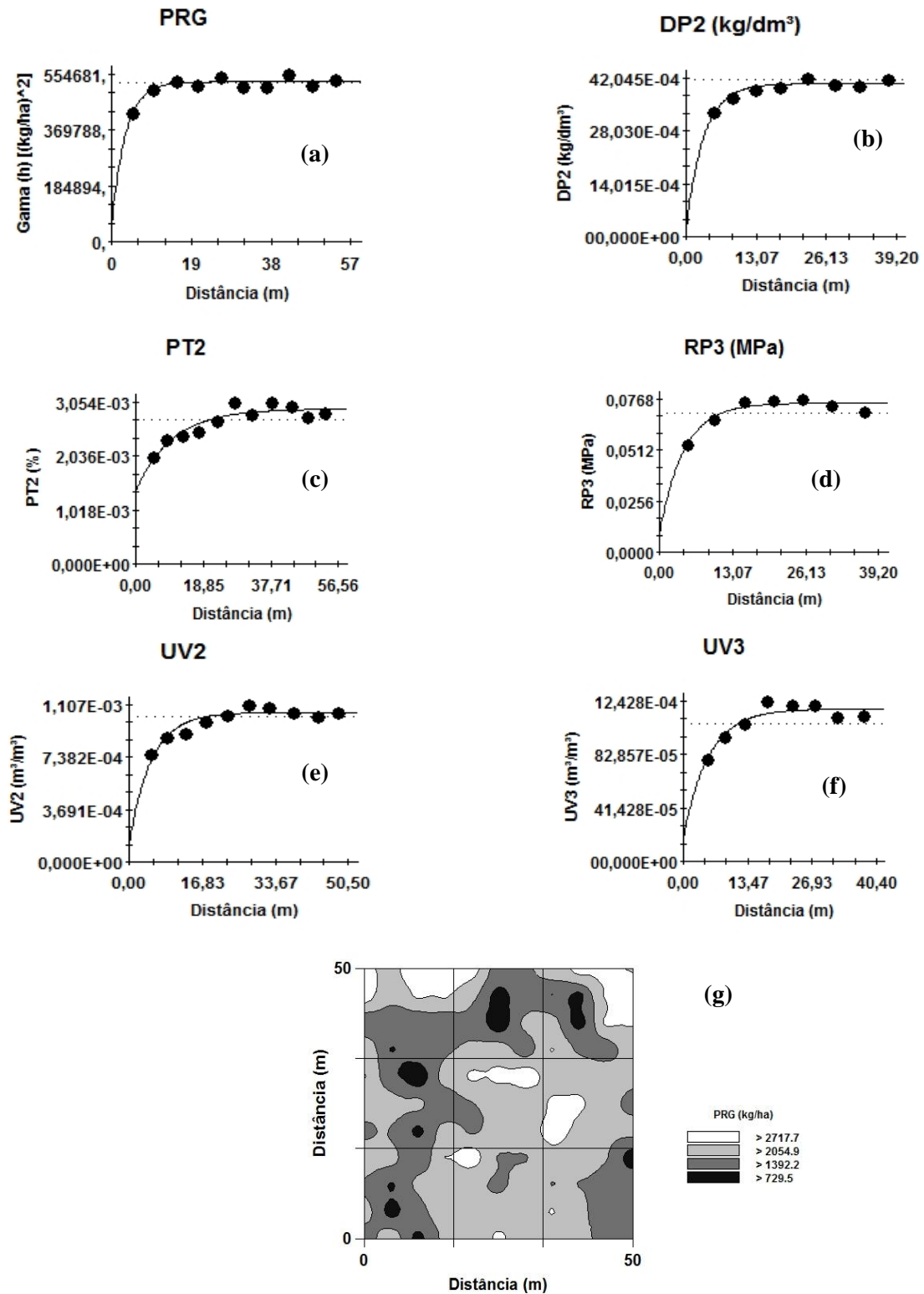


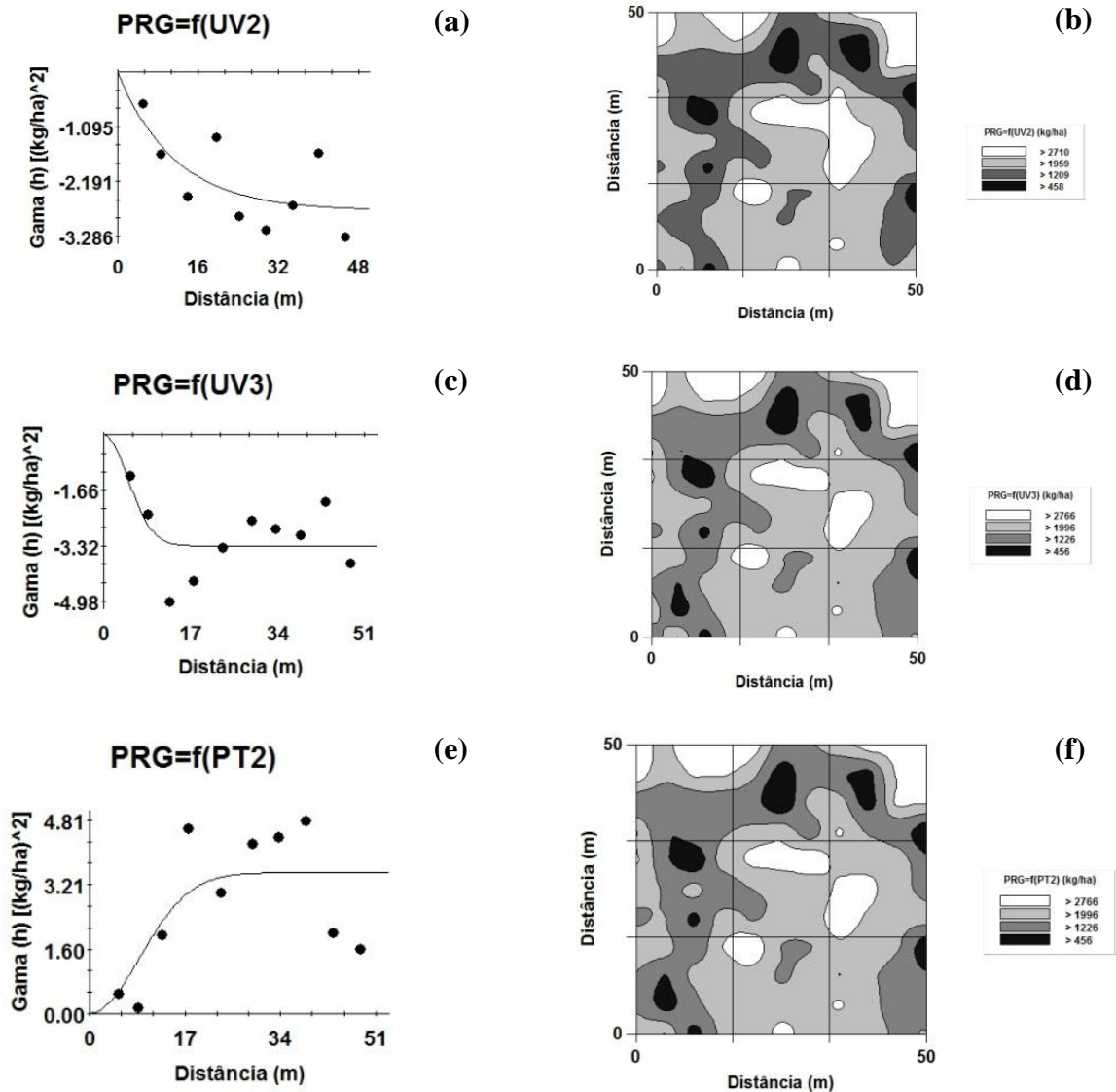
Figura 1. Componentes geoestatísticos da produtividade de grãos de feijão (PRG) e dos atributos do solo DP2, PT2, RP3, UV2 e UV3 em um Latossolo Vermelho distrófico, em Chapadão do Sul, MS, safra 2011/12.

No âmbito da correlação entre atributos da planta x solo, os modelos matemáticos resultaram nas seguintes cokrigagens: $PRG = f(UV2)$, $PRG = f(UV3)$, $PRG = f(PT2)$, $PRG = f(RP3)$ e $PRG = f(DP2)$, cujos coeficientes de determinação espacial (r^2) variaram entre 0,066 e 0,502, equivalentes à variação da dependência espacial (ADE) entre 88 e 100 % (Figura 2).

Os melhores parâmetros resultantes das cokrigagem foram da $PRG = f(UV2)$ e $PRG = f(RP3)$ onde os coeficientes de determinação espacial foram de 0,502 e 0,296, respectivamente, com alcances de 33,87 e 9,14 m. Em trabalho

semelhante Montanari et al. (2010) constataram que apenas a umidade gravimétrica (UG2) resultou em cokrigagem com a produtividade de grãos de feijão, cujo coeficiente de determinação espacial (r^2) foi de 0,63, equivalente ao ADE de 61,6%.

Em consonância com o presente estudo Martins et al. (2009) encontraram oito cokrigagens ($PRG = f(DS1)$, $PRG = f(DS3)$, $PRG = f(UG3)$, $PRG = f(UV1)$, $PRG = f(UV2)$, $PRG = f(UV3)$, $PRG = f(RP1)$ e $PRG = f(RP4)$), cujos r^2 variaram entre 0,105 e 0,734, equivalentes ao ADE entre 96,1 e 99,9 %.



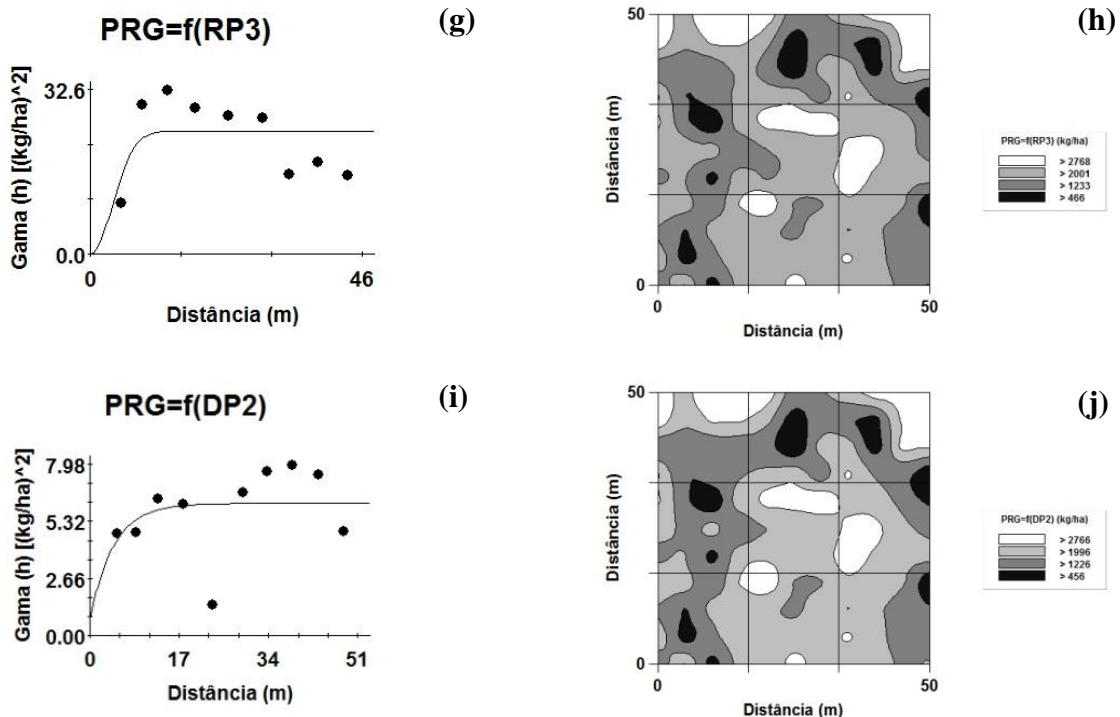


Figura 2. Componentes geoestatísticos da produtividade de grãos de feijão (PRG) em função dos atributos do solo UV2, UV3, PT2, RP3 e DP2 em um Latossolo Vermelho Distrófico, em Chapadão do Sul, MS, safra 2011/12.

Pelos mapas de krigagem (Figuras 1 e 2) é possível visualizar o sítio da região central da área estudo como maior produtividade. Tal fato está associado aos maiores valores de umidades volumétricas e porosidade total. Nos sítios encontrados no estudo de Megda (2008) houve excelente correlação inversa entre a produtividade do feijão e a porosidade total do solo. Isso ocorreu porque nos sítios onde a porosidade total aumentou a produtividade de grãos variou de 2.279 a 2.064 kg.ha⁻¹ e naqueles onde a porosidade diminuiu, a produtividade ficou entre 2.921 e 3.349 kg.ha⁻¹.

Pelo exposto, em virtude da PRG e os atributos RP3 e UV2 serem ajustados perfeitamente nos semivariogramas e também quando cokrigados com a PRG serem excelentes atributos secundárias, pode-se relacionar os atributos RP3 e UV2 como indicadores da qualidade do solo da área estudada, quando o objetivo for estimar a produtividade de grãos de feijão para as condições de Chapadão do Sul, Estado do Mato Grosso do Sul.

Conclusões

A umidade do solo, a densidade da partícula e a resistência à penetração foram os atributos que

mais se relacionaram com a estimativa da qualidade física do solo;

No ano agrícola 2011/12 mesmo apresentando maior densidade do solo e resistência à penetração, ocorreu maior produtividade de grãos de feijão em relação ao de 2010/11;

Por meio da análise de regressão é possível estimar a PRG em função da umidade gravimétrica e a resistência à penetração;

Os atributos pesquisados não variaram aleatoriamente, seguindo padrões espaciais bem definidos, com alcances da dependência espacial entre 4,0 e 39,0 m.

Referências

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.D.R.; OLIVEIRA, I.A.; SANTOS, L.A.C. & AQUINO, R.E. Spatial variability of physical attributes in Alfisol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state,



- Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, v.56, p.149-159, 2013.
- 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 Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.765-771, 2006.
- CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.8, p. 1151-1159, 2002.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.933-942, 2008.
- CORÁ, J.E.; ARAUJO, V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.
- DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; ONÃ, F.S.; ANDREOTTI, M. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, V.70, n.4, p.908-916, 2011.
- DEMATTÊ, J.L.I. **Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1980. 146 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 412 p.
- GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.169-177, 2005.
- FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; CENTURION, J.F. & BARBOSA, G.F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.27, n.1, p.61-67, 2005.
- FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V. & CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.113-121, 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola, 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>. Acesso em: 19/10/2012.
- 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 do Solo**, v.31, n.2, p.361-379, 2007.
- MARTINS, M.V.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M. & MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.31, n.1, p.147-154, 2009.
- MEGDA, M.M.; CARVALHO, M.P.; VIEIRA, M.X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.781-788, 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 e Agrotecnologia**, v.30, n.2, p.199-205, 2006.
- MONTANARI, R.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F.C.;



- LOVERA, L.H.; HONORATO, M.A.O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1811-1822, 2010.
- MONTANARI, R.; LIMA, E.S.; LOVERA, L.H.; GODOY, L.T.R.; HENRIQUE, A.F.; DALCHIAVON, F.C. Correlación de la productividad de un forraje com las propiedades físicas de um Ultisol em Aquidauana. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 102-110, 2013.
- PIMENTEL-GOMES, F.P., GARCIA, C.H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- ROBERTSON, G.P. GS⁺ geostatistics for the environmental sciences: GS⁺ user's guide. Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.
- ROQUE, M.W.; MATSURA, E.E.; SOUZA, Z.M.; BIZARI, D.R.; SOUZA, A.L. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.1827-1835, 2008.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F.F.S.; GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.2, p.287-295, 2009.
- SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. SAS: system for elementary statistical analysis. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 905 p.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: Complete samples. **Biometrika**, 52:,1965. 591-611p.
- SILVA, M.G.; ARF, O.; ALVES, M.C.; BUZETTI, S. Sucessão de culturas e sua influência nas propriedades físicas do solo e na produtividade do feijoeiro de inverno irrigado, em diferentes sistemas de manejo do solo. **Bragantia**, v.67, n.2, p.335-347, 2008.
- SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; COLET, M.J.; RODRIGUE, L.H.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; MANDOLIN, R.J.A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, v.40, n.4, p. 840-847, 2010.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.34, n.6, p.1763-1771, 2004.
- 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**, v.15, p.229-235, 1991.
- STONE, L.F.; FERREIRA, E.P.B.; DIDONET, A.D.; HEINEMANN, A.B.; OLIVEIRA, J.P. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.19-25, 2013.
- VAUCLIN, S.; VIEIRA, SR; VACHAUD, G. & NIELSEN, DR O uso de cokrigagem com as observações limitadas de solo de campo. **Sci solo. Soc. Sou. J.**, v.47, p.175-184, 1983.
- VIEIRA S.R.; HATFIEL, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, p.1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., SCHAEFER, G. R. (ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.