

Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial

Correlation indices physical space of soil and productivity of fruit tomato industry

Danilo Gomes de Oliveira^{1*}, Elton Fialho dos Reis², João Carlos Medeiros³, Marcos Paulo de Oliveira Martins⁴, Anderson da Silva Umbelino⁵

Resumo: Com a mecanização em todas as etapas de manejo das culturas, o solo passou a receber maior carga superficial, o que provoca mudanças em suas propriedades físicas, com possíveis reflexos na produção. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar a variabilidade e a correlação espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho com a produtividade de tomate industrial. Para isso, montou-se uma malha amostral utilizando um receptor *global positioning system* (GPS), com 84 pares de pontos espaçados de 80 x 80 m. Após a construção da malha, foram retiradas em campo amostras na camada 0,00-0,20 m para mensurar os atributos físicos do solo e dados da planta. As variáveis medidas foram: densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP), a textura do solo e a produtividade do tomate. Os valores obtidos foram analisados utilizando-se a geoestatística, sendo classificados segundo o grau de dependência espacial. Logo após, utilizando o método de interpolação por krigagem ordinária e cokrigagem ordinária, foram estimados os valores para locais não amostrados, permitindo a confecção de mapas de isovalores e a definição de zonas de manejo no campo. A correlação espacial dos atributos físicos com os componentes de produção pelo método de Cokrigagem ordinária verificou correlação espacial somente entre os atributos (solo x solo) densidade e teor de areia. A utilização da geoestatística e a construção dos mapas por meio da krigagem e cokrigagem ordinária permitiram identificar distintas zonas de manejo, ou seja, a variabilidade dos atributos do solo e da produtividade.

Palavras-chave: Atributos do solo. *Solanum lycopersicum*. Variabilidade espacial.

Abstract: With mechanization at all stages of crop management, the soil began to receive a higher surface load, which causes changes in its physical properties with possible production impacts. Thus, the objective of this work was to evaluate the variability and spatial correlation of the physical attributes of a Red Latosol with the productivity of industrial tomatoes. For this, a sample mesh was assembled using a global receiver positioning system (GPS), with 84 pairs of spaced apart 80 x 80 m points. After the mesh construction, samples in the 0.00-0.20 m layer were collected in the field to measure the physical attributes of the soil and plant data. The variables measured were: soil density (Ds), soil penetration resistance (PR), soil texture and tomato productivity. The values obtained were analyzed using geostatistics, and were classified according to the degree of spatial dependence. Then, using the ordinary kriging interpolation method and ordinary cokriging, the values for non-sampled sites were estimated, allowing the mapping of isovalues and the definition of management zones in the field. The spatial correlation of the physical attributes with the production components by the ordinary Cokriging method verified spatial correlation only between attributes (soil x soil) density and sand content. The use of geostatistics and the construction of the maps by means of kriging and ordinary cokrigation allowed to identify different management zones, that is, the variability of soil attributes and productivity.

Key words: Soil attributes. *Solanum lycopersicum*. Spatial variability.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 15/03/2017 e aprovado em 23/10/2017

¹Professor Mestre em Engenharia Agrícola, Instituto Federal do Tocantins, Campus Colinas do Tocantins- TO, Brasil; *email: danilo.oliveira@ifto.edu.br;

²Professor Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Campus Anápolis-GO, Brasil; fialhoreis@ueg.br;

³Professor Doutor em Agronomia, Universidade Federal do Piauí, Campus Cinobelina Elvas, Bom Jesus-PI, Brasil; medeiros.jc@gmail.com;

⁴Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Campus Anápolis- GO, Brasil; xumbs.s.u_anderson@hotmail.com

⁵Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Campus Anápolis-GO, Brasil; marcospmartins.92@gmail.com

INTRODUÇÃO

O solo é um sistema complexo, resultante de vários fatores e processos, que juntos conferem suas características e propriedades (SILVA *et al.*, 2015). A variabilidade espacial do solo é uma característica que deve ser considerada na amostragem da área, o que possibilita um maior detalhamento e evidencia pontos que requerem manejo diferenciado, tais como: densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP) e atributos químicos. Possibilitando um maior detalhamento da área e indicando os locais com necessidades de cuidados no manejo diferenciado das plantas (SILVA NETO *et al.*, 2012).

O desenvolvimento das plantas pode ser influenciado por atributos do solo, tais como textura, densidade do solo, porosidade e estabilidade dos agregados do solo (MONTANARI *et al.*, 2015). As principais alterações são evidenciadas pela diminuição das trocas gasosas e da taxa de infiltração de água no solo e pelo aumento da resistência à penetração (DALCHIAVON *et al.*, 2014). Dessa forma, esses atributos podem ser considerados como indicadores de qualidade do solo. Quando associados ao estudo de variabilidade espacial, permitem o monitoramento de áreas que sofreram algum tipo de interferência antrópica (AQUINO *et al.*, 2014). O conhecimento da variabilidade espacial e temporal dos fatores inerentes à produtividade agrícola do solo constitui uma informação relevante para a tomada de decisão, quanto às práticas de manejo a serem adotadas em relação à física do solo.

A utilização de forma contínua do solo pode tornar sua estruturação física modificada, podendo promover sua compactação, ou seja, alteração nos valores de Ds e da RP. A Ds possui estreita relação com atributos do solo, como a textura, porosidade, teor de matéria orgânica, permeabilidade e condutividade hidráulica (BASSO *et al.*, 2011). O aumento da Ds acarreta diminuição da porosidade total, da macroporosidade e da condutividade hidráulica, assim como o consequente aumento da RP (FERREIRA *et al.*, 2010). A RP é um atributo do solo dependente da Ds e do conteúdo de água contido no solo (FILHO *et al.*, 2015). Segundo Campos *et al.* (2012), a RP tem sido utilizada como indicador da qualidade física do solo por ser diretamente relacionado ao crescimento das plantas.

A RP afeta diretamente o crescimento, a morfologia e a profundidade do sistema radicular. Quanto maior a RP menor a produtividade das culturas. Esse decréscimo em produtividade ocorre, principalmente, pela redução da absorção de água e nutrientes pelas raízes e envio da concentração de ácido abscísico das raízes à parte aérea, o que induz a planta a diminuir seu crescimento (GIRARDELLO *et al.*, 2014). Diferentes valores críticos de RP têm sido reportados na literatura, porém, os valores de 2,0 MPa têm sido os mais utilizados como crítico para solos argilosos, podendo influenciar no crescimento das raízes (BETIOLI JUNIOR *et al.*, 2014). A partir desse limite, considera-se que

a RP afeta negativamente o crescimento de plantas, podendo causar reduções severas na produtividade da cultura.

Diante da relação dos atributos físicos do solo com a produtividade do tomate industrial, objetivou-se com este trabalho avaliar a correlação espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho com os componentes de produção do tomate industrial.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na fazenda Madeira, município de Gameleira de Goiás, GO, com altitude de 940 m, e coordenadas 16° 22'17,3''S e 48°35'20,5''O. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho textura franco-argilosa (EMBRAPA, 2013). A precipitação para os dias de coleta foram de, em média, 50 mm, segundo INMET, 2015. Com uma declividade média de 1%.

A aquisição de dados teve início no mês de março de 2015, sendo então coletados antes do plantio do tomate, quando foi construída uma malha amostral de 84 pares de pontos, espaçados de 80 x 80 m, totalizando uma área de 57 ha (Figura 1). Para isso, utilizou-se um receptor *global positioning system* (GPS) com sistema de correção diferencial em tempo real (SAD69).

Amostras indeformadas, para a determinação da densidade do solo (Ds), amostras deformadas, para determinação da textura, e a umidade do solo, na camada de 0,0 a 0,20 m, foram coletadas em cada um dos 84 pontos do grid. Para a Ds, a coleta das amostras foi realizada com auxílio de um amostrador do tipo "Uhland", utilizando cilindros de aço inoxidável com volume aproximado de 100 cm³. A umidade do solo e textura foram determinadas, conforme Donagema *et al.* (2011), na camada 0,00-0,20 m. Para a umidade, foram utilizadas amostras composta, formadas por cinco sub-amostras colhidas em cada ponto da malha amostral. Após a coleta, as amostras eram levadas à estufa a 105 °C, por 24 h.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com um penetrógrafo eletrônico da marca *Falker PLG1020*, seguindo as normas da ASAE S 313 (ASABE, 2006). Foram realizadas cinco medições de resistência do solo à penetração, em um raio de 3 m a partir da coordenada de cada ponto amostral, na camada de 0,0-0,20 m.

A produção das mudas foi realizada em viveiro comercial localizado no município de Goiânia-Go. O transplantio da cultivar Cangata foi realizado com linhas duplas de plantio, com espaçamento de 1,2 m entre linhas, com densidade populacional de 30 mil plantas por ha. Na adubação, usou-se a formulação 2-30-10 + 0,3 B + 0,2 Zn, em 500 kg ha⁻¹ e 5000 Kg/ há⁻¹ de cama de frango a lanço, seguindo a recomendação da cultura utilizando a análise do solo.

A avaliação da produtividade (PROD) do tomate industrial foi realizada demarcando uma área de 1 m²

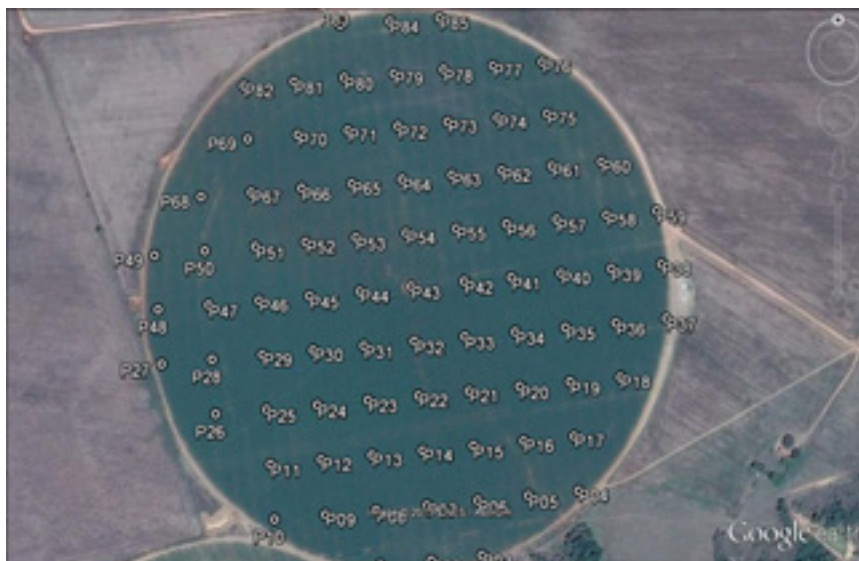


Figura 1 - imagem georreferenciada da área de estudo (Google Earth, 2016).

Figure 1 - Georeferenced image of the study area (Google Earth, 2016).

em cada ponto da malha amostral georreferenciada. Posteriormente, os frutos foram pesados em balança de precisão e classificados de forma visual, quantificando cada peso, conforme a pigmentação do epicarpo em tomates verdes (VERDE), “de vez” (VEZ) e maduro (MAD).

Para análise dos dados, realizou-se a estatística descritiva. Para os cálculos dos semivariogramas e seus respectivos ajustes, utilizou-se o software geoestatístico GS+ versão 7.0. As análises de correlação foram realizadas com o auxílio do programa Microsoft Excel, versão 2010 (FIGUEIREDO FILHO e SILVA JUNIOR, 2009). Os Critério de interpretação do índice de correlação linear (r) de Pearson utilizado foram: $0,7 \leq r \leq 1,0$, para Correlação forte, $0,4 \leq r < 0,6$, para Correlação moderada, $0,1 \leq r < 0,3$, para Correlação fraca, e $0,0 \leq r < 0,1$, para Correlação nula. Os modelos foram selecionados com base no maior valor de R^2 e na menor soma de quadrados dos resíduos (RSS), conforme descrito em Dalchiavon *et al.* (2011). Os modelos foram classificados de acordo com o grau de dependência espacial (GDE), proporção entre o efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C_0 + C$), seguindo classificação proposta por Dalchiavon e Carvalho (2011). Com $GDE < 20\%$ Muito baixa, $20\% \leq GDE < 40\%$ Baixa, $40\% \leq GDE < 60\%$ Média, $60\% \leq GDE < 80\%$ Alta, $80\% \leq GDE < 100\%$ Muito alta e $GDE = 100\%$ como efeito pepita puro (EPP). Após a escolha do melhor modelo, realizou-se a construção dos mapas de isolinhas e interpolações pelo método da krigagem e da cokrigagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os elevados valores de CV verificados para os atributos do solo sugerem alta heterogeneidade em torno da média,

Conforme Cruz *et al.* (2012). Essa heterogeneidade pode ter diferentes causas, dentre as quais podem ser destacadas a gênese do solo e a declividade que influencia na distribuição das partículas do solo devido ao arraste (BETONI; LOMBARDI NETO, 2008). Considerando que a área apresentava baixa declividade, a heterogeneidade deve ser pela gênese do solo. Em geral, essa heterogeneidade é devida às condições pré-existentes ou às características relacionadas com a formação do solo e com suas interações com a flora, a fauna e o manejo para os cultivos. O uso do solo em cultivos agrícolas introduz novas fontes de heterogeneidade, tais como: a distribuição irregular de restos de culturas, dos insetos, das doenças, das ervas daninhas, dos adubos aplicados, das espécies ou genótipos cultivados e da irrigação (GOMEZ & GOMEZ, 1984; STEEL *et al.*, 1997).

Os atributos físicos do solo podem ser representados pelos valores médios, pois apresentam distribuição de frequência do tipo normal segundo teste de kolmogorov-smirnov (DALCHIAVON *et al.*, 2011), com os coeficientes de assimetria positiva, variando entre 0,85 e 1,30, e negativa entre -0,86 e -0,22. Já os coeficientes de curtose positiva, variaram entre 0,22 e 4,64, e as negativas entre -0,90 e -0,27 (Tabela 1).

O valor médio de (RP), na camada 0,00-0,20 m, foi de 1,29 Mpa (Tabela 1), que, segundo Hoffer *et al.* (2015), não é crítico para o desenvolvimento e crescimento das plantas em um solo de textura franco-argilosa.

Em relação aos componentes de produção do tomate industrial, o coeficiente de variação (CV) foi de 32,4% para os tomates maduros (MAD), 33% de tomates “de vez” (VEZ), 60% tomates verdes (VERDE) e 22% para produtividade total, com média de produção de 82,72 Mg ha⁻¹, variando de 34,4 a 121,8 Mg ha⁻¹ (Tabela 1), com

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos atributos físicos do Latossolo Vermelho e componentes de produção do fruto do tomate industrial**Table 1** - Descriptive statistics of the physical attributes of Red Latosol and components of fruit production of industrial tomato

	Ds (Mg m ⁻³)	Argila	Areia	Silte	RP MPa	Us g g ⁻¹	PROD (Mg ha ⁻¹)			
							MAD	VEZ	VERDE	Total
Média	1,41	430	340	228	1,29	0,26	43,20	19,30	20,30	82,72
Mediana	1,42	450	320	230	1,17	0,26	43,80	19,50	18,80	78,70
DP	0,16	8,50	11,47	3,70	3,59	0,10	14,00	6,50	12,20	18,40
Curtose	-0,97	-0,27	0,37	0,31	0,22	0,04	0,30	6,00	0,40	-0,19
Assimetria	-0,35	-0,56	0,85	-0,86	0,87	0,01	-0,10	1,30	0,80	0,08
Mínimo	1,06	170,0	170,0	120	0,74	0,11	4,20	7,90	1,90	34,40
Máximo	1,60	550,0	710,0	300	2,32	0,48	82,20	51,80	54,60	121,8
CV (%)	11,3	19,7	33,7	16,0	27,9	36,30	32,40	33,00	60,00	22,00
R(PROD)	10,6*	1,66*	-6,00*	15,8	15,9*	-7,80	0,55*	0,53	0,46*	1
R(VERDE)	-0,05	-0,18*	0,17	-0,11*	0,23*	0,22*	-0,35*	0,43*	1	0,46*
R(VEZ)	0,08	0,02*	-0,06	0,13	0,14	0,01	0,001	1	0,43	0,53*
R(MAD)	0,15*	0,18*	-0,22*	0,25*	-0,07	-0,02	1	0,01	-0,35*	0,55

CV(%) - coeficiente de variação; Ds - densidade do solo; RP - resistência do solo a penetração; Us - umidade do solo; R(PROD) - correlação de Pearson com a produtividade; R(VERDE) - correlação de Pearson com a tomates VERDE; R(VEZ) - correlação de Pearson com a tomates VEZ; R(MAD) - correlação de Pearson com a tomates MADUROS.* Significativo a 5%.

CV (%) - coefficient of variation; Ds - soil density; RP - soil penetration resistance; Us - soil moisture; R (PROD) - Pearson's correlation with productivity; R (GREEN) - Pearson's correlation with GREEN tomatoes; R (TIME) - Pearson's correlation with tomatoes VEZ; R (MAD) - Pearson's correlation with ripe tomatoes.

amplitudes dos valores próximas às encontradas por Marouelli *et al.* (2005) para o fruto do tomate industrial. A média da produtividade da cultura foi superior ao do estado de Goiás, conforme CONAB (2014). Já em relação a tomates MAD e VEZ, que são tomates aproveitados pela indústria, tiveram suas médias de 19,31 e 43,27 Mg ha⁻¹, tendo uma variação de 4,26 a 82,20 e 7,96 a 51,97 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Utilizando os valores da produtividade total, as propriedades físicas do solo Ds, teor de argila, areia, silte, RP e umidade apresentaram os valores de correlação significativa, sendo classificados, segundo a adaptação feita por Figueiredo Filho e Silva Junior (2009), como correlação nula e fraca, correlação semelhante foi encontrada por Kitamura *et al.* (2007), o qual avalia a relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto.

Verifica-se na Tabela 2 que os dados obtidos para a Ds foram melhores explicados pelo modelo linear, sendo menor a proporção do efeito pepita (C_0) para o patamar (C_0+C_1), bem como maior a proporção da contribuição (C_1) para o patamar, indicando semelhança entre os valores vizinhos, apresentando maior continuidade do fenômeno e menor variância da estimativa (Tabela 2), conforme Miguel (2010). Esta análise pode ser visualizada por meio do grau de dependência espacial (GDE), na qual se verifica que esta variável apresentou muito alto GDE, concordando com o

estudo de JUNQUEIRA JR *et al.* (2008). Verifica-se que as demais variáveis apresentaram valores de GDE classificados como muito baixo a média, variando de 1,67 a 43,62%.

Para a RP, o modelo exponencial explicou melhor os dados, porém, apresentando GDE muito baixo, segundo classificação de Dalchiavon *et al.* (2012). O alcance variou em torno de 29 m, ou seja, abaixo da distância definida na malha de amostragem (80 m), sendo necessária a readequação da malha amostral para uma segunda coleta dos dados para próximo do valor do alcance.

Os atributos argila e areia apresentaram dependência espacial muito baixa, variando de 13,94 e 14,02% (Tabela 2). O modelo que melhor explicou os dois atributos foi o Gaussiano. Os valores encontrados para o alcance foram de 96 e 98 m, para a argila e areia, respectivamente, sendo esses valores maiores que a distância da malha amostral utilizada para a coleta dos dados.

Segundo Andriotti (2013), representa uma zona de influência que separa as observações correlacionadas das independentes, ou seja, os dados que se encontram acima do alcance não se correlacionam espacialmente, como pode ser observado nos modelos que se adequaram aos atributos físicos argila e areia (Tabela 2).

Os componentes de produção em cada estágio de desenvolvimento do fruto do tomate industrial apresentaram alcances diferentes entre eles, não sendo observada relação entre os valores. Batista *et al.* (2009) obtiveram modelos

Tabela 2 - Semivariogramas simples para os atributos físicos do solo, produtividade do tomate e cruzado entre os atributos Ds vs teor de areia**Table 2** - Simple semivariograms for soil physical attributes, tomato productivity and cross between attributes Ds vs. sand content

Geoestatística								
$\gamma(h)$ simples dos atributos físicos do solo								
	Camada(cm)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A (m)	R ²	RSS	GDE(%)
Ds	(0-20)	Linear	0,011	0,013	747,72	0,165	3.10 ⁻⁵	84,61
Us	(0-20)	Esférico	1,70	101,60	111,00	0,090	110 ⁻³	1,67
RP	(0-20)	Exponencial	14800,0	131300	29,00	0,073	4.10 ⁻⁸	11,27
Arg	(0-20)	Gaussiano	10,300	73,86	96,00	0,884	1.10 ⁻²	13,94
Are	(0-20)	Gaussiano	19,100	136,20	98,00	0,780	1.10 ⁻²	14,02
$\gamma(h)$ simples para os componentes de produção								
T. MAD		Esférico	90,30	207,00	437,00	0,91	9.10 ¹	43,62
T. VEZ		Gaussiano	0,10	31,75	97,00	0,86	4.10 ²	0,31
T. VERDES		Esférico	16,30	235,90	678,00	0,96	1.10 ³	6,91
Total		Exponencial	29,80	310,00	109,00	0,52	2.10 ⁴	9,61
$\gamma(h)$ Cruzado para solo vs solo								
Ds x areia		Gaussiano	0,327	2,66	1546,0	0,660	1.10 ⁻³	12,29

Ds - densidade do solo; Us - umidade do solo; RP - resistência do solo à penetração; Arg - teor de argila; Are - teor de areia; T. MAD - tomate industrial maduro; T. VEZ - tomate industrial "de vez"; T. VERDE - tomate industrial verde; Ds x Areia - semivariogramas cruzado para densidade e teor de areia no solo; C₀ - Efeito pepita; C₀+C₁ - Patamar; A - alcance; R² - Coeficiente de determinação; RSS - soma de quadrado do resíduo; GDE - grau de dependência espacial.

Ds - soil density; Us - soil moisture; RP - soil resistance to penetration; Arg - clay content; Are - sand content; T. MAD - mature industrial tomato; T. VEZ - industrial tomato "once"; T. VERDE - green industrial tomato; Ds x Sand - cross-semivariograms for density and soil sand content; C₀ - Nugget effect; C₀ + C₁ - Porch; A - reach; R² - Coefficient of determination; RSS - sum of square of residue; GDE - degree of spatial dependence.

semelhantes e valores próximos em seu trabalho com tomate em ambiente protegido. O modelo que melhor se ajustou aos componentes de produção foi o esférico, para produção de tomates MAD e VERDE, com GDE classificado em médio e muito baixo (DALCHIAVON *et al.*, 2012), com um alcance de 437 e 678 m, demonstrando a distância máxima que os dados apresentam dependência espacial. Em relação aos tomates VEZ, verifica-se a presença do modelo gaussiano, com um GDE muito baixo, quase próximo a zero.

Embora os valores da produtividade total apresentem CV baixo (Tabela 1), eles são capazes de detectar a variabilidade espacial existente, sendo então verificada a dependência espacial, explicada pelo modelo exponencial. Segundo Landim (2006), é possível captar pequenas variabilidades a menores distâncias, com um GDE muito baixo e um alcance próximo a 109 m. Resultados semelhantes foram observados por Boesing *et al.* (2014) em lavoura comercial de soja.

Os melhores parâmetros resultantes das cokrigagem para os atributos físicos do solo foram Ds vs conteúdo de areia, Ds=f(areia), onde os coeficientes de determinação espacial foram de 0,66 com alcances de 1.546 m, corroborando com as correlações espaciais feitas por Martins *et al.* (2009). Já Montanari *et al.* (2010) constataram que apenas a umidade resultou em cokrigagem com a produtividade de grãos de

feijão, cujo coeficiente de determinação espacial (r^2) foi de 0,63, equivalente ao GDE de 61,6%.

A Figura 2A mostra o mapa de densidade do solo, sendo possível visualizar que nas regiões Norte ocorreram os maiores valores de Ds, com média variando entre 1,28 à 1,48 Mg m⁻³ (Tabela 1). Esses valores são próximos aos encontrados por Lovera *et al.* (2015), que observaram Ds de 1,37 Mg m⁻³. Segundo Montanari *et al.* (2012), o limite crítico para densidade nessa classe de solo é de 1,50 Mg m⁻³, que aumenta com a redução do teor de argila do solo e dos espaços vazios entre partículas do solo, como pode ser verificado no mapa de areia (Figura 2B).

Quanto à textura do solo, verifica-se um comportamento padrão entre os teores de argila (Figura 2C) e silte (Figura 2D) e inversos entre os teores de areia (Figura 2B). Para a argila, os menores valores (217 g kg⁻¹) estão ao sudoeste do talhão e para areia estão os maiores valores (523 g kg⁻¹), constatando a presença de solos com textura média, segundo classificação feita com base na metodologia proposta por Donagema *et al.* (2011).

Observa-se no mapa de contorno da RP que existe variabilidade dentro da área em estudo (Figura 3A), apresentando uma amplitude de variação, com regiões isoladas de valores mais elevados de RP (2,24Mpa). Os valores acima de 2,0 MPa têm sido os mais utilizados

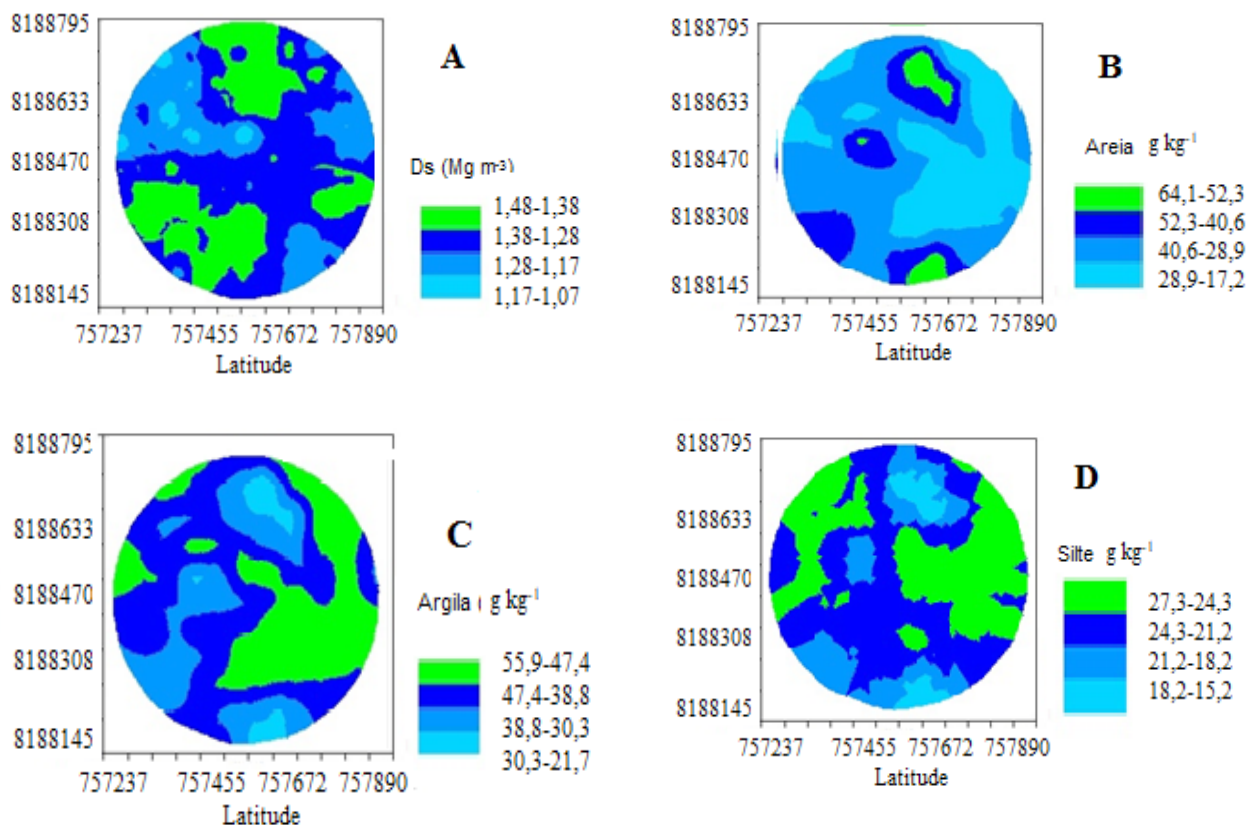


Figura 2 – Mapas de contorno para: densidade do solo (A); teor de areia (B); teor de argila (C); teor de Silte (D).

Figure 2 - A - Contour map for soil density; B - Contour map for the sand content (g kg^{-1}); C - Contour map for clay content (g kg^{-1}); D - Contour map for the silt content (g kg^{-1}).

como crítico para solos argilosos, com surgimento de compactação, podendo influenciar no crescimento das raízes (BETIOLI JUNIOR *et al.*, 2014).

Na Figura 3B, encontra-se o mapa interpolado da umidade do solo, observa-se que a amplitude de variação foi baixa, as maiores umidades encontram-se ao norte e sul do mapa. Os valores de umidade do solo obtidos durante a determinação da RP apresentaram média de $0,26 \text{ kg kg}^{-1}$ (Tabela 1). Essa diferença no conteúdo de água é importante em razão de ser o parâmetro que mais influencia os valores de RP, podendo ser verificada na correlação linear negativa de Person e mostrada na Figura 3. Nas Figuras 3A e 3B, foi possível verificar visualmente que as regiões de maiores umidades equivalem as de menor RP, e as de menor umidade apresentam valores superiores de RP.

Ainda na análise de correlação de Pearson, a Tabela 1 demonstrou que a RP correlaciona-se negativamente com a umidade do solo no valor de $-0,47$. Sendo o mais importante na espacialização é encontrar as áreas que necessitam de intervenção mecânica para a redução da resistência à penetração, o que pode ter ocorrido nas áreas acima de $1,87 \text{ Mpa}$, pois essa região apresenta teores de água elevados.

O mapa de produtividade total e os demais mapas de classificação segundo a pigmentação do epicarpo (Figura 4) também apresentaram variação, com maior produtividade na região Nordeste, com valor de 115 Mg ha^{-1} ; $62,3 \text{ Mg ha}^{-1}$; $32,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $53,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente, para Produtividade total, MAD, VEZ e VERDE.

Com relação aos mapas de cokrigagem observado na Figura 5A, foi possível verificar a relação entre teor de areia e densidade do solo, pois as regiões onde se encontra maior quantidade de areia também apresentam maior valor de densidade do solo.

A Figura 5 mostra como a variação da textura do solo influenciou a densidade do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Reichardt e Timm (2004) e Libardi (2005), os quais mostraram que solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, sob as mesmas condições, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de $1,3$ a $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto em solos argilosos essa variação é de $0,9$ a $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ (CARVALHO *et al.*, 2011), valores próximos aos encontrados na área em estudo.

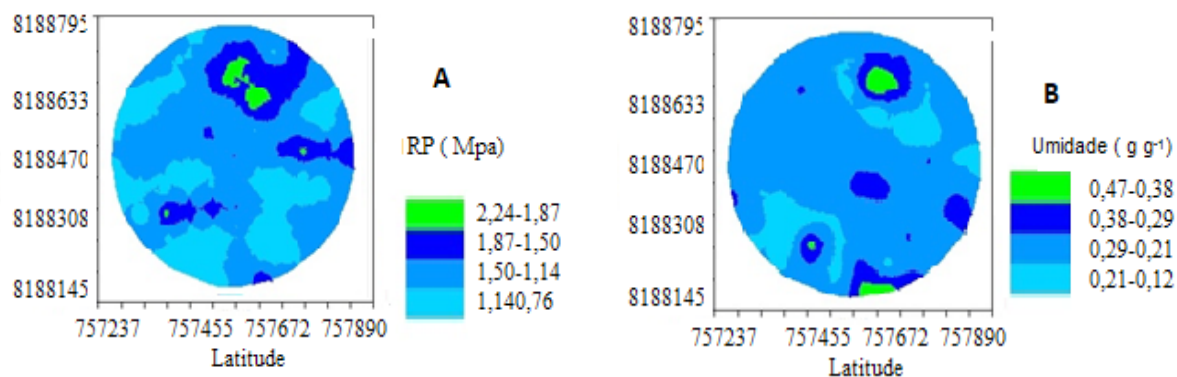


Figura 3 – Mapas de contorno para: Resistência do solo a penetração (A); umidade do solo (B).
 Figure 3 - Contour maps for: Soil penetration resistance (A); soil moisture (B).

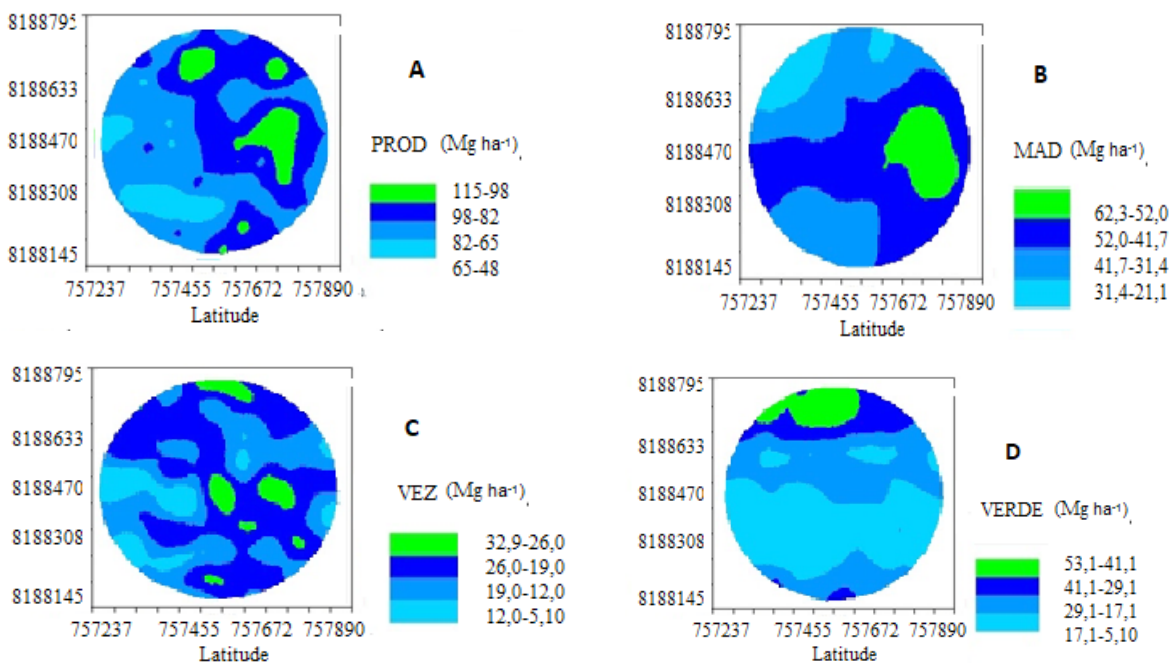


Figura 4 – Mapas de contorno para: PROD (A); MAD (B); VEZ (C); VERDE (D).
 Figure 4 - Contour maps for: PROD (A); MAD (B); VEZ (C); GREEN (D).

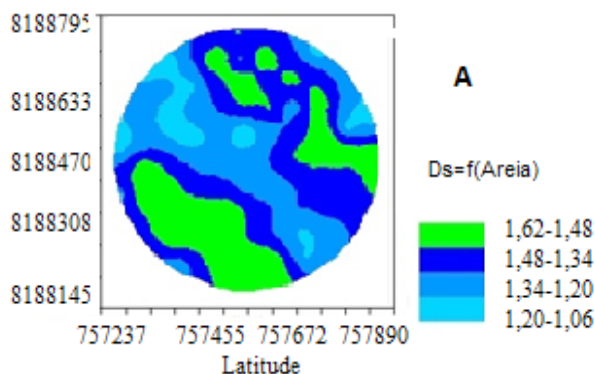


Figura 5 – Mapas de contorno para: semivariogramas cruzados para os atributos do solo densidade e teor de areia no solo (A).

Figure 5 - Contour maps for: cross-semivariograms for soil attributes density and soil sand content (A).

CONCLUSÕES

A correlação espacial dos atributos físicos com os componentes de produção pelo método de Cokrigagem ordinária verificou correlação espacial somente entre os atributos (solo x solo) densidade e teor de areia;

A variabilidade espacial do mapa de Ds apresentou regiões com valores próximos ao limite crítico ao desenvolvimento das plantas para essa classe de solo;

Dentre os modelos matemáticos da Geoestatística, os que melhor explicaram os resultados foram os modelos Gaussiano, esférico e Exponencial;

A utilização da geoestatística e a construção dos mapas por meio da krigagem e cokrigagem ordinária permitem identificar distintas zonas de manejo.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

ANDRIOTTI, J. L. S.; Fundamentos de Estatística e Geoestatística. Editora UNISINOS. 3ª ed. p. 166. 2013

AQUINO, R. E. ; CAMPOS, M. C. C.; JÚNIOR, J. M.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. E. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciências do solo**. 2014;38:5:397-406. doi:10.1590/S0100-06832014000200004

ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers. Soil cone penetrometer. ASABE Standard S313.2. St. Joseph. p. 903-904. 2006

BASSO, F. C.; ANDREOTTI, I. M.; CARVALHO, M. P.; LODO, B. N. Relações entre produtividade de sorgo forrageiro e atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo do Cerrado. **Pesquisa agropecuária Tropical**. 2011;41:1:135-144. doi:10.5216/pat.v41i1.7099

BATISTA, I. F.; SILVA, A. F.; ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial da produção de tomate cultivado em ambiente Protegido. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2009, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2009.

BERTONI, J.; LOMBARDI, F. N. Conservação do solo. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008;355.

- BETIOLI JUNIOR, E.; TORMENA, C. A.; MOREIRA, W. H.; BALL, B. C.; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Aeration condition of a clayey Oxisol under log-term no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2014;38:3:990-999. doi:10.1590/S0100-06832014000300031
- BOESING, B. F. B.; BOTTEGA, E. L.; CATEN, A. T.; SARTORI, L.; ARAMOTO, R. H. Variabilidade espacial de índices de vegetação na cultura da soja em estádio reprodutivo. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - ConBAP, 2014, São Pedro – SP. **Anais...** São Pedro: USP/ESALQ, 2014.
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. V.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Revista Agro@ambiente**. 2012;6:1:09-16. doi:10.18227/1982-8470ragro.v6i1.689
- CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. B. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2011;15:940-949. doi:10.1590/S1415-43662011000900010
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: TOMATE INDUSTRIAL Safra 2014. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t>>. Acesso em: Maio 2016.
- CRUZ, E. A.; MOREIRA, G. R.; PAULA, M. O.; OLIVEIRA, A. C. M. Coeficiente de variação como medida de precisão em experimentos com tomate em ambiente protegido. **Enciclopédia Biosfera**. 2012;8:14:220-233. <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/agrarias/coeficiente.pdf>>
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M.; BEM, E. A. D. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**. 2014;61:2:255-264. doi:10.1590/S0034-737X2014000200014
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. 2011;41:2:8-19. doi:10.5216/pat.v41i1.8351
- DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. Manual de métodos de análise de solos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 230. 2011.
- EMBRAPA. Cultivo de tomate para industrialização. 2003. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial/expediente.htm>>. Acesso em: 15 Mai. 2016.
- FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Ciências Agrárias**. 2010;31:4:913-932. doi:org/10.5433/1679-0359.2010v31n4p913
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, J. A. Desvendando os mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)*. **Revista Política Hoje**. 2009;18:3:115-146. doi: 10.11606/issn.2237-4485.lev.2014.132346
- FILHO, F. X. L.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2015;19:2:186–193. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193
- GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciências do solo**. 2014;38:4:1234-1244. doi:10.1590/S0100-06832014000400020
- GOMEZ, K. A. and GOMEZ; A. A. (1984). Statistical procedures for agricultural research (2 ed.). John wiley and sons, NewYork, 680 p.
- HOFFER, H.; DEBASTIANI, A. B.; NETO, R. P. M.; MENEGATTI, D.; NETO, S. L. R. Variabilidade espacial do estado de compactação do solo em um sítio experimental de *Mimosa Scabrella Benth*. **Enciclopédia Biosfera**. 2015;11:21:1903. <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015b/agrarias/variabilidade%20espacial.pdf>>
- JUNQUEIRA, J. A. J.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub bacia hidrográfica de Cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**. 2008;32:3:914-922. doi:10.1590/S1413-70542008000300032

- 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 Ciências do Solo**. 2007;31:361-369. doi:10.1590/S0100-06832007000200018
- LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra Didática**. 2006;2:1:19-33. < http://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/CienciadoSolo/gepag/t_didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf>
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: EDUSP. 2005;335.
- LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; SILVA, T. S. Variabilidade espacial da soja e de alguns atributos físicos de um Latossolo In. IV SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2015. Botucatu. **Anais...** São Paulo: UNESP, 2015.
- 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**. 2009;31:1:147-154. doi:10.4025/actasciagron.v31i1.6641
- MIGUEL, F. R. M. Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade em área cultivada com cana-de-açúcar. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agronômico. Campinas.
- 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**. 2010;34:1:1811-1822. doi:10.1590/S0100-06832010000600005
- MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho, **Revista Ceres**. 2012;59:1:125-135. doi.org/10.1590/S0034-737X2012000100018
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações. Barueri: Manole, 2004;478.
- SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. L. L.; DIM, V. P.; NEVES NETO, D. N.; SILVA, J. E. C. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Bioscience journal**. 2012;28:1:41- 43. <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/12587>>
- SILVA, J. T. A.; SIMÃO, F. R.; ALVES, J. J. M. Desenvolvimento vegetativo e produção do pinhão-mansão em resposta à adubação fosfatada. **Revista Ceres**. 2015;62:3:319-322. doi:10.1590/0034-737X201562030012
- STEEL, R. G. D.; TORRI, J. H. 1997. Principles and procedures of statistics: A Biometrics Approach, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.