



ARTIGO ORIGINAL

Guilherme Adalberto Ferreira Castioni¹
Zigomar Menezes de Souza¹
Reginaldo Barboza da Silva²
Milton César Costa Campos³
José Luiz Rodrigues Torres^{4*}

Modelagem da qualidade do solo para identificação de áreas com potenciais de produtividade do feijão

Soil quality modeling to identify areas with bean yield potential

¹ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia Agrícola, Av. Cândido Rondon, 501, Barão Geraldo, 13083-875, Campinas, SP, Brasil

² Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Registro, Rua Nelson Brihi Badur, 430, 11900-000, Registro, SP, Brasil

³ Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Rua 29 de agosto, 786, Divino Pranto, 69800-000, Humaitá, AM, Brasil

⁴ Instituto Federal do Triângulo Mineiro – IFTM, Campus Uberaba, Rua João Batista Ribeiro, 4000, 38064-790, Uberaba, MG, Brasil

*Autor Correspondente:

E-mail: jlrtorres@iftm.edu.br

PALAVRAS-CHAVE

Análise multivariada
Geoestatística
Análise textural
Atributos físicos

KEYWORDS

Multivariate analysis
Geostatistical analysis
Textural analysis
Physical attributes.

RESUMO: A utilização de tecnologia associada à variabilidade espacial otimiza os sistemas de produção agrícolas e pode alterar a produtividade das culturas. O objetivo deste estudo foi delinear áreas com diferentes potenciais de produção de feijão irrigado por pivô central, utilizando técnicas geoestatística e análise multivariada. A amostragem do solo foi realizada em uma malha regular com intervalos de 10 m, totalizando 180 pontos nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Em seguida, foi determinado o teor de argila, argila dispersa em água, grau de floculação, areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina e diâmetro médio ponderado do agregado do solo. Para a análise de produtividade, a amostragem foi realizada nos 180 pontos da malha e em cada ponto foram coletadas todas as plantas numa área de 1,0 m². Foram realizadas análise estatística descritiva, análise multivariada e geoestatística. A variável argila dispersa em água, areia fina, grau de floculação e argila podem ser utilizadas em solos sob o mesmo sistema de manejo para identificar locais com diferentes potenciais de produtividade e mais afetados pela prática da irrigação. As maiores produtividades do feijoeiro relacionaram-se com maiores teores de argila, areia muito fina e diâmetro médio ponderado de agregados nas três profundidades estudadas. As análises geoestatística e multivariada mostram-se ferramentas eficientes na avaliação da variabilidade espacial dos atributos de solo.

ABSTRACT: *The use of technology associated with spatial variability optimizes agricultural production systems and can alter crop yields. This study aimed to delineate areas with different potential yield of center pivot irrigated beans, using geostatistical techniques and multivariate analysis. Soil sampling was carried out in a regular grid with 10 m intervals, totaling 180 points in the depths of 0.00-0.10 m, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m, the clay content, water dispersible clay flocculation, very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand and soil aggregate weighted average diameter were subsequently determined. Sampling for the yield analysis was performed in 180 grid points in each point were collected all plants present in an area of 1.0 m². We performed descriptive statistical, multivariate and geostatistics analysis. The variable water clay dispersion, fine sand, flocculation and clay content can be used in soil under the same management system to identify sites with different potential productivity and more affected by the practice of irrigation; The highest yield of common bean correlated with higher clay, very fine sand and weighted average diameter of aggregates in the three studied depths; The geostatistics and multivariate analysis showed to be effective tools in evaluating the spatial variability of soil attributes.*

1 Introdução

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), considerando o Mercosul, tem participação superior a 90% na produção e no consumo. A área total de feijão cultivada no país irá atingir 3,28 milhões de hectares na safra 2014/15, com uma produção estimada de 3,37 milhões de toneladas (CONAB, 2014).

O feijão pode ser cultivado o ano todo na maioria dos estados brasileiros, desde que não ocorram limitações de temperatura e umidade. Quando associado à irrigação, pode ser produzido na entressafra, com menor custo, maior qualidade e produtividade (Torres et al., 2013). Dalchiavon et al. (2011) destacam que dentre os fatores relacionados ao aumento da produtividade das culturas estão os processos de modernização e racionalização da agricultura, que a integração de fontes de dados melhora a gerência da produção agrícola.

O gerenciamento da variabilidade espacial da produção e os fatores a ela relacionados, somados à agricultura de precisão compõem um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para a otimização dos sistemas de produção (Miqueloni & Bueno, 2011). Devido à condição natural da área e ao manejo adotado, é comum que ocorra variabilidade espacial e temporal do solo, afetando o desenvolvimento das plantas (Santos et al., 2012).

A formação dessa variabilidade por efeito da heterogeneidade da área pode ser prejudicial ao planejamento agrícola. Isto ocorre devido à falta de informações detalhadas sobre os solos, da ausência do mapeamento e identificação das áreas com diferentes padrões de variabilidade. Os dados gerados nestas áreas podem ser analisados através da análise de componentes principais e análise de agrupamentos, que apresentam como vantagens a redução dimensional do problema e a facilidade de interpretação (Alves et al., 2014).

Outras formas de análises também podem ser utilizadas nestas áreas com elevada variabilidade. Siqueira et al. (2014) propuseram uma abordagem conjunta, utilizando geoestatística e altitude média da área, visando compreender a relação de causa e efeito entre a variabilidade dos atributos do solo e a resposta das culturas agrícolas considerando a declividade do terreno. Pereira et al. (2013) destacam o uso de modelos de paisagem como segmento de vertentes para segmentar o relevo, enquanto que Silva et al. (2010) destacam o uso da geoestatística, sensoriamento remoto e lógica *fuzzy*.

A utilização conjunta de elementos da paisagem, análise geoestatística e multivariada têm mostrado eficiência na identificação de áreas com diferentes potenciais de resposta para café, cana, laranja e soja (Siqueira et al., 2014). Kravchenko & Bullock (2002) verificaram a aplicabilidade do uso destas ferramentas para identificação de áreas com diferentes potenciais de produção de leguminosas, em que os atributos do solo e a topografia local explicaram cerca de 40% da variabilidade espacial da produtividade das culturas. Alves et al. (2014) verificaram que a variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo, técnicas de geoestatística e análise multivariada justificaram a qualidade física do solo.

A carência de informações detalhadas sobre variabilidade e mapeamento dos atributos do solo tem-se tornado um fator limitante para o crescimento de diferentes áreas do conhecimento e setores produtivos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo

foi delinear áreas com diferentes potenciais de produção de feijão irrigado por pivô central, utilizando análise geoestatística e multivariada.

2 Material e Métodos

O estudo foi conduzido em uma área experimental na fazenda Varjão, no município de Cristalina-GO, localizada entre as coordenadas geográficas de 16°53'35,59" de latitude sul e 47°32'16,75" de longitude oeste e altitude de 1022 metros, irrigada com pivô central.

O clima da região é classificado como do tipo Cwa, isto é, tropical de altitude, segundo a classificação climática proposta por Köppen, com chuva entre os meses de outubro e maio e com período seco de junho a setembro. A região apresenta precipitação pluviométrica anual de 1.600 mm, concentrada no período do verão, pois o inverno é caracterizado pela ausência de precipitações na maioria dos anos, temperatura média anual de 20,5 °C e umidade relativa em torno de 40% no inverno e 70% no verão (Schmidt & Valiati, 2006).

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2013), com 441, 45 e 514 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente. O relevo da área é classificado como de planalto, em que mais de 70% é definido como plano ou suavemente ondulado.

O solo foi cultivado com feijão cultivar carioca (*Phaseollus vulgaris* L.) em sucessão à cultura da soja (*Glycine max* L.), irrigada por pivô central cobrindo uma área total de 78 ha, sob o sistema semeadura direta. A densidade final de plantio foi de 9,4 plantas por metro, que foram semeadas com 0,45 m de espaçamento entrelinhas e 15 sementes por metro linear.

Na semeadura do feijão, foram aplicados 300 kg ha⁻¹ da fórmula 10-30-10 (N – P₂O₅ – K₂O) em todas as parcelas. Na adubação de cobertura, foram utilizados 190 kg ha⁻¹ da fórmula 30-00-20, de acordo com análise química de solo.

O manejo de água foi feito por aspersão, utilizando a técnica de pivô central, sendo a lâmina aplicada correspondente a 50% da evapotranspiração da cultura (ETc), calculada com base na média do ano anterior. Os valores de umidade referência foram estimados a partir do monitoramento da umidade do solo, avaliados por tensiômetros.

A aplicação de água foi realizada utilizando de 8 a 10 mm a cada dois dias. As coletas visando à caracterização da água foram realizadas no local de captação (córrego), antes da sucção da bomba d'água, mergulhando-se o frasco de coleta com a boca voltada contra a corrente no líquido a ser amostrado. O frasco foi devidamente preso a um peso e arremessado a um ponto distante da margem, em cinco pontos da barragem de bombeamento para o pivô central. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em frascos e enviadas ao laboratório para análise química (Tabela 1), segundo as normas da American Public Health Association (APHA, 2005).

As amostras coletadas para avaliação dos atributos físicos foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20; e 0,20-0,30 m, nos pontos de cruzamento de malha, com intervalos regulares de 10 m em três posições ao longo do declive de uma área de 1,8 hectares (Figura 1). Cada ponto da malha amostral foi georreferenciado, determinando a posição

Tabela 1. Caracterização química da água de irrigação em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob cultivo de feijão no sistema semeadura direta, em Cristalina-GO, em 2011.

Table 1. Chemistry and physics characterization of irrigation water in a Ultisol bean cultivation in no-tillage system at Cristalina-GO, in 2011.

	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	C.E.
Elementos	ALD	ALD	1,0	ALD	ALD	ALD	7,7	7,0

ALD = abaixo do limite de detecção (<0,005).

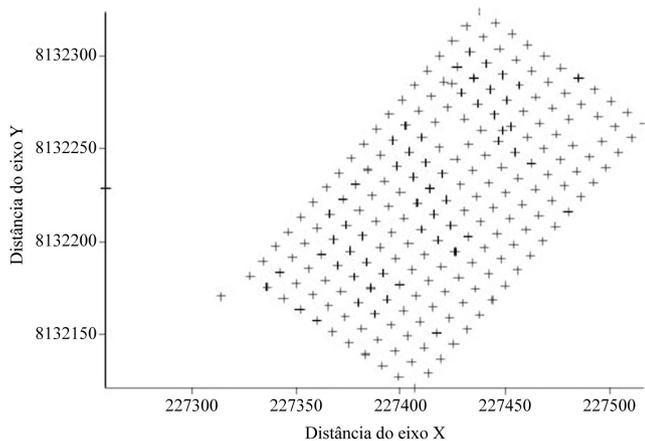


Figura 1. Representação dos 180 pontos amostrais, georreferenciados a intervalos regulares de 10 m.

Figure 1. Representation of 180 sampling points, georeferenced at regular intervals of 10 m.

topográfica e a altitude, com o auxílio de uma estação total e equipamento de sistema de posição global (DGPS).

A análise granulométrica, argila dispersa em água e grau de floculação, foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação (EMBRAPA; CNPS, 2011). O fracionamento da fração areia foi determinado por meio de tamisamento a seco.

Os agregados do solo foram avaliados pelo método descrito por Kemper & Chepil (1965), no qual os agregados foram obtidos mediante manipulação com as mãos, aplicando força de tração, sendo usados para peneiramento em água os agregados que passaram na peneira de 9,52 mm e retidos na de 4,76 mm. Depois da secagem ao ar, os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,76 mm por dez minutos. Para peneiramento dos agregados em água, foram utilizadas as peneiras com diâmetros de malha 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm, separando os agregados nas classes: C₁ (9,52-4,76 mm), C₂ (4,76-2,0 mm), C₃ (2,0-1,0 mm), C₄ (1,0-0,5 mm), C₅ (0,5-0,25 mm) e C₆ (< 0,25 mm).

A hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do programa computacional SAS. Os valores de atributos maiores do que a média mais quatro desvios padrão foram descartados. O número de dados descartados foi sempre inferior a 10% de cada conjunto de 180 dados. A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas, com base na pressuposição

de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 1:

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

Em que: N(h) é o número de pares experimentais de observações Z(x_i) e Z(x_i + h) separados por uma distância h. O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C₀; patamar, C₀+C₁; e o alcance, a). Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano.

Estes modelos foram ajustados por meio do programa GS+. Posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas (krigagem). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi considerado o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer.

Para a análise de produtividade da cultura do feijão, a amostragem foi realizada nos 180 pontos da malha: em cada ponto foram coletadas cinco plantas presentes numa área de 1,0 m² (1,0 × 1,0 m), utilizando um gabarito de madeira. Os valores de massa de grãos foram corrigidos para 13% de umidade e expressos em kg ha⁻¹.

A análise de componentes principais (ACP) foi agrupada por grupos de produtividade. Com base nos valores de quartil foram criados 4 grupos de produtividade: 1 - Alta (Al) ≥ 1.260,16 kg ha⁻¹; 2 - Moderada (Md) – entre 1.260,16 e 1.058,21 kg ha⁻¹; 3 - Baixa – entre 1.058,21 e 932,30 kg ha⁻¹; 4 - Muito baixa (MBx) < 701,43 kg ha⁻¹. Foram calculadas médias para os atributos do solo nas diferentes profundidades em função dos grupos de produtividade. A ACP foi utilizada para identificar qual dos atributos físicos utilizados tem maior potencial de caracterização de áreas com diferentes potências de produtividade do feijoeiro, que foi realizada com base na matriz de correlação das variáveis padronizadas (Alves et al., 2014).

3 Resultados e Discussão

Todas as variáveis granulométricas avaliadas apresentaram distribuição normal, exceto areia grossa (AG) e areia muito grossa (AMG), de acordo com o teste de Komolgorov-Smirnov nas três profundidades analisadas (Tabela 2), em que foi observado que ocorreu homogeneidade textural na camada 0,00-0,30 m, considerando média para toda a área. Os valores de média e mediana das demais frações em estudo são próximos, indicando que os dados não possuem assimetria acentuada.

Tabela 2. Análise descritiva e teste de normalidade para os atributos textura e diâmetro médio ponderado dos agregados nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e produtividade da cultura do feijão em um Argissolo Vermelho-Amarelo.**Table 2.** Descriptive analysis and normality test for the texture attributes and weighted aggregates at depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m mean diameter of the bean crop productivity in a Ultisol.

Variável	Prof. (m)	Média	Mediana	CV	Assimetria	Curtose	PV
Arg (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	380,78	384,00	15,41	-0,01	-0,05	<0,0100
	0,10-0,20	388,13	384,00	13,11	-0,28	0,89	<0,0100
	0,20-0,30	398,52	399,00	13,53	-0,63	0,92	<0,0100
ArgDisp (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	167,84	165,08	22,81	0,26	-0,87	<0,0100
	0,10-0,20	186,32	183,33	25,03	0,61	0,28	<0,0100
	0,20-0,30	191,99	189,98	26,66	0,27	-0,52	<0,0100
GF (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	56,48 a	56,92	12,85	-0,17	-0,50	<0,0100
	0,10-0,20	53,32 a	52,59	13,18	-0,62	1,58	<0,0100
	0,20-0,30	52,24 b	52,86	14,17	-1,10	2,88	<0,0100
AMF (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	96,06	93,00	14,05	-0,33	-0,60	<0,0100
	0,10-0,20	97,27	96,00	15,24	2,32	11,05	<0,0100
	0,20-0,30	98,15	97,00	14,38	2,32	11,05	<0,0100
AF (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	299,12	302,00	13,70	-0,49	-0,12	<0,0100
	0,10-0,20	304,22	314,00	13,55	-0,50	-0,17	<0,0100
	0,20-0,30	301,46	301,50	12,71	-0,20	0,11	<0,0100
AM (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	140,74	138,00	18,37	-0,12	3,57	<0,0100
	0,10-0,20	138,40	137,00	15,15	0,51	0,20	<0,0100
	0,20-0,30	133,79	130,00	18,48	1,03	1,78	<0,0100
AG (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	10,51	9,00	63,88	3,04	12,00	>0,1500
	0,10-0,20	9,43	8,00	50,48	2,61	13,24	>0,1500
	0,20-0,30	9,36	8,00	44,05	2,29	10,27	>0,1500
AMG (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	5,24	4,20	83,78	2,11	4,77	>0,1500
	0,10-0,20	5,12	4,10	75,25	2,79	10,57	>0,1500
	0,20-0,30	5,11	4,48	59,97	1,28	2,00	>0,1500
DMP (mm)	0,00-0,10	1,58	1,49	34,09	-0,19	-0,60	<0,0100
	0,10-0,20	1,58	1,58	27,58	-0,10	-0,22	<0,0100
	0,20-0,30	1,69	1,77	30,78	0,19	0,12	<0,0100
Produtividade (kg ha ⁻¹)	-	1.537	1.489	21,11	-0,07	0,61	<0,0100

Arg = Argila; ArgDisp = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; AMG = areia muito grossa; DMP = diâmetro médio ponderado; CV = Coeficiente de variação; PV = teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov.

A semelhança entre os valores da média, mediana e moda indicam que estes podem apresentar ou se aproximar da normalidade, evidenciando que as medidas de tendência central não têm domínio de valores discrepantes com relação a sua distribuição. Desta forma, os atributos granulométricos avaliados aproximam-se de uma distribuição normal, que são adequados para o uso da geoestatística.

Os maiores valores de Arg ocorreram nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, sendo que os valores médios de ArgDisp variaram de 58,80 a 202,84 g kg⁻¹, comprovando a eluviação da argila para as camadas subsuperficiais (Tabela 2). Este processo natural que ocorre neste tipo de solo é diretamente influenciado pela declividade média do terreno, que, com base no modelo digital, de elevação foi de 4,5%. Nestas condições, pode-se afirmar que está ocorrendo o rearranjo das partículas do solo, que está contribuindo para o adensamento desta faixa de solo.

Segundo Silva et al. (2012), mesmo em áreas de baixa declividade e com 50% a 70% de cobertura do solo ocorre movimentação de partículas do solo, ocorrendo adensamento das áreas de menores cotas do terreno.

Em estudo semelhante em Argissolo Vermelho-Amarelo em área irrigada, Apolino et al. (2006) observaram que a ArgDisp desse solo variou de 27,5 a 100,5 g kg⁻¹, que equivale a aproximadamente 50% do valor obtido neste estudo. Concluíram que a argila foi sendo liberada em meio aquoso e carregada às menores cotas do terreno.

Campos et al. (2012) comprovaram que a forma variável do relevo exerce forte influência no processo de transporte e deposição de sedimentos, promovendo a migração de partículas finas ao longo do perfil do solo, que pode ser influenciada pelos ventos, com a erosão eólica transportando grandes quantidades de partículas de argila em determinadas regiões.

Quanto ao alcance para os atributos físicos nas profundidades estudadas, os menores valores foram verificados para AG, AMG e DMP, concordando com os valores de maiores CV, o que refletiu maior variabilidade (Tabela 3). A ArgDisp, DMP e AMF apresentaram os menores alcances na camada de 0,00-0,10 m, aumentando no perfil, demonstrando que houve o carregamento de partículas finas para as camadas mais profundas, promovendo a homogeneização desses atributos.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para as variáveis analisadas, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em um Argissolo Vermelho-Amarelo.**Table 3.** Parameters of semivariograms adjusted for the variables analyzed, at depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m in a Ultisol.

Variável	Prof. (m)	Modelo	C_0	Patamar	C_0/C_0+C_1	R^2	Alcance
Arg (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Esf ⁵	1616,0	3233,00	0,50	0,80	60,40
	0,10-0,20	Exp	1611,0	3330,00	0,51	0,85	87,30
	0,20-0,30	Exp	1463,0	3047,00	0,52	0,90	99,30
ArgDisp (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Exp	461,00	0,03	1514	0,92	13,00
	0,10-0,20	Exp	754,00	0,06	1509	0,84	25,20
	0,20-0,30	Exp	0,00	0,02	0,86	0,82	22,50
GF (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Gaus	7,20	47,46	0,848	0,92	10,21
	0,10-0,20	Exp	19,35	39,71	0,50	0,85	42,00
	0,20-0,30	Exp	6,70	54,58	0,87	0,84	14,70
AMF (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Esf	38,60	126,20	0,69	0,72	23,80
	0,10-0,20	Exp	30,7	238,7	0,87	0,59	21,3
	0,20-0,30	Esf	40,10	114,70	0,65	0,63	28,1
AF (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Esf	703,00	1486,00	0,52	0,91	59,20
	0,10-0,20	Esf	814,00	1781,00	0,54	0,94	42,10
	0,20-0,30	Esf	703,00	1407,00	0,50	0,84	39,30
AM (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Exp	209,30	454,40	0,53	0,92	93,60
	0,10-0,20	Exp	49,00	387,30	0,87	0,53	28,50
	0,20-0,30	Exp	45,00	489,20	0,90	0,68	23,10
AG (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Exp	0,88	8,68	0,89	0,53	24,30
	0,10-0,20	Exp	1,95	16,94	0,88	0,91	21,20
	0,20-0,30	Exp	1,11	9,29	0,88	0,67	25,80
AMG (g kg ⁻¹)	0,00-0,10	Exp	2,12	4,25	0,5	0,93	18,40
	0,10-0,20	Exp	0,59	5,34	0,89	0,31	14,40
	0,20-0,30	Exp	0,69	6,01	0,88	0,54	20,40
DMP (mm)	0,00-0,10	Exp	0,02	0,25	0,89	0,71	17,70
	0,10-0,20	Exp	0,01	0,14	0,89	0,74	21,00
	0,20-0,30	Exp	0,07	0,25	0,72	0,88	26,50

Arg = Argila; ArgDisp = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; AMG = areia muito grossa; DMP = diâmetro médio ponderado; C_0 = Efeito Pepita; C_0/C_0+C_1 = Grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação; Exp = exponencial; Esf = esférico (Esf⁵ = que apresentou maior exatidão).

Estes resultados corroboram com os observados por Soares et al. (2005), que trabalhando em área de Latossolo Vermelho, avaliando perfis verticais separados em terços superior, médio e inferior, relataram que houve o preenchimento de poros pelas partículas mais finas nas escalas do terreno de menor cota.

O coeficiente de variação (CV) nas frações AG, AMG e DMP apresentaram os maiores coeficientes para três profundidades estudadas, apresentando as maiores variabilidades da área, o que pode refletir a dependência espacial. Esta variabilidade está relacionada aos elevados valores obtidos da ArgDisp que aumentou em profundidade, ao menor GF da argila nas camadas subsuperficiais, que, associados à declividade da área, posição na paisagem e movimentação do solo apenas na linha de plantio na camada superficial, contribuem para o rearranjo das partículas do solo, com a migração das partículas menores para a camada superficial, conforme também observado por Castione et al. (2015).

Estudando a variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, Souza et al. (2004) observaram CV alto para AG. Para todos os atributos físicos avaliados, o coeficiente de variação médio foi de 31% na

profundidade de 0,00-0,10 m, na profundidade de 0,10-0,20 m foi de 28% e na profundidade de 0,20-0,30 m foi de 26%.

A reorientação da ArgDisp no perfil do solo para as camadas subsuperficiais é um processo natural que ocorre nos Argissolos, contudo, esta migração de partículas finas é favorecida em solos agricultáveis com irrigação, por conta da modificação estabelecida pelo manejo, deixando a fração argila com maior concentração crítica de dispersão. Segundo Silva & Cabeda (2006), esse efeito pode ter origem nas mudanças químicas provocadas pelos diversos sistemas de manejo, como o desequilíbrio de cátions e alterações no pH do solo, que podem promover a dispersão de argila, que, associada às condições de chuva e/ou irrigação, eluvia e bloqueia os poros.

A dispersão de argila e o teor de areia explicam os baixos valores de DMP, uma vez que a dispersão provocada pela água promove o desprendimento e exposição da matéria orgânica que está envolvida e sua forma física protegida de forças da água ou do solo. Partículas de argila e matéria orgânica na camada superficial são extraídas pelo escoamento superficial, esse processo enriquece o material erodido, que, em seguida, são redistribuídas ao longo do perfil ou reorientadas para as áreas depressionais (Polyakov & Lal, 2004).

Na distribuição dos agregados do solo estáveis em água, a classe predominante foi a de 1,58 a 1,69 mm nas profundidades estudadas (Tabela 2). Os menores valores dessa classe influenciaram os baixos valores de DMP, discordando de Stone et al. (2013), que correlacionando a produtividade do feijoeiro em sistema de cultivo orgânico e os atributos do solo em Latossolo Vermelho distrófico, encontraram valores médios para DMP de 5,75 mm, em razão do elevado teor de matéria orgânica e argila naquele solo que favorece a atividade microbiana conferindo maior agregação.

O conteúdo de AG e AMG foi superior nas partes de maior altitude do terreno nas três profundidades avaliadas (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), com isso pode-se afirmar que o fluxo acumulado não favorece a presença destas frações para as partes mais baixa do terreno. Os maiores pesos das frações AG e AMG não favoreceram o seu movimento a grandes distâncias, contrariamente às frações mais finas que são arrastadas com mais facilidade pela força da água. Tal fato corrobora a afirmação de que ocorre o transporte seletivo de partículas, regulado pela pedofoma. O transporte diferenciado das frações do solo para as partes de menor cota do terreno foi observado por Miqueloni & Bueno (2011).

O comportamento das frações granulométricas AM e AF é contrário ao de AG e AMG, no entanto apresenta distribuição diferenciada nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Os maiores teores de AM e AF ocorrem nas partes do terreno de menor cota, em que há maior expressão de fluxo acumulado de água, que promove a migração das partículas do solo em profundidade. Verifica-se que o fluxo favorece a presença das frações AM e AF no terço inferior da encosta e

nas zonas de maior declive nas profundidades estudadas, por conta do enriquecimento residual e transporte para a parte inferior da área estudada.

Nenhum valor de DMP excedeu 2,0 mm, evidenciando a baixa estabilidade dos agregados, devido provavelmente ao alto teor de areia e à dispersão da argila (Tabela 2). Concordando com os resultados obtidos por Tavares Filho et al. (2010) que trabalharam com Latossolo Vermelho distrófico. Para Oliveira et al. (2010), o uso de irrigação pode desestruturar o solo, por conta do fracionamento de agregados de maior diâmetro em menores unidades. Segundo Azambuja et al. (2012), o fornecimento de água via irrigação pode proporcionar um número maior de ciclos de umedecimento e secagem, fato que poderia incrementar o processo de compactação pela ação da água no sistema de irrigação.

A análise de componentes principais (ACP) para um grupo de variáveis, mais a produtividade, foi aplicada nas três profundidades estudadas. Verificou-se que os valores obtidos foram suficientes para condensar 72,03% da variabilidade contida nos dados originais, sendo 58,40% no primeiro componente principal (Eixo 1) e 18,64% no segundo componente (Eixo 2) (Figura 2).

A contribuição da ACP, neste caso, foi a ordenação das variáveis físicas com relação a sua importância sobre a produtividade, em ordem decrescente, para ArgDisp, AF, GF, Arg, AM, AG, DMP, AMG e AMF que respondem por 10,36%; 10,25%; 9,92%; 9,91%; 9,35%; 9,09%; 8,66%; 7,75%; e 1,75% dos valores observados, o que facilita a análise dos dados em duas dimensões em relação ao número de fatores analisados. As variáveis ArgDisp, AF, GF e Arg explicam 40,44% da

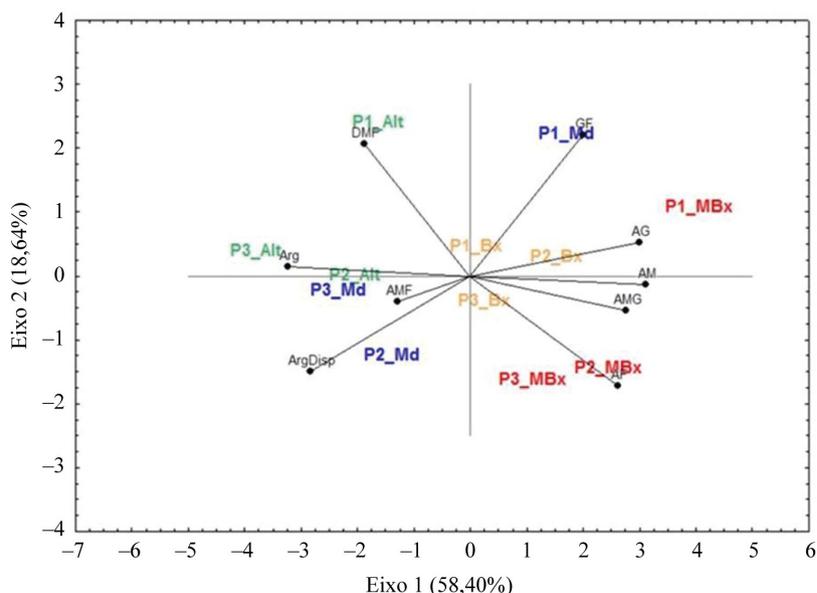


Figura 2. Representação bidimensional dos componentes principais (biplot) da análise de componentes principais. Arg = argila; ArgDisp = argila dispersa em água; AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AM = areia média; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; DMP = diâmetro médio ponderado; P1 = profundidade de 0,00-0,10 m; P2 = profundidade de 0,10-0,20 m; P3 = profundidade de 0,20-0,30 m; produtividade alta - Alt $\geq 1.260,16 \text{ kg ha}^{-1}$; moderada - $1.260,16 \text{ kg ha}^{-1} > \text{Md} \geq 1.058,21 \text{ kg ha}^{-1}$; baixa - $1.058,21 > \text{Bx} \geq 932,30 \text{ kg ha}^{-1}$; muito baixa - $\text{MBx} < 701,43 \text{ kg ha}^{-1}$.

Figure 2. Dimensional representation of the principal components 1 and 2 (biplot) of principal components analysis. Arg = clay; ArgDisp = water dispersible clay; AMG = very coarse sand; AG = coarse sand; AM = medium sand; AMF = very fine sand; AF = fine sand; WMD = weighted mean diameter; P1 = 0.00 to 0.10 m depth; P2 = 0.10-0.20 m layer; P3 = depth of 0.20-0.30 m; High productivity - $\text{Al} \geq 1260.16 \text{ kg ha}^{-1}$; moderate - $1260.16 \text{ kg ha}^{-1} > \text{Md} \geq 1058.21 \text{ kg ha}^{-1}$; Low - $1058.21 > \text{Bx} \geq 932.30 \text{ kg ha}^{-1}$; very low - $\text{MBX} < 701.43 \text{ kg ha}^{-1}$.

variância total, podendo ser utilizadas como indicadores físicos do solo para áreas com diferentes potenciais de produtividade do feijoeiro.

Em estudo semelhante, avaliando a variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com café, Silva et al. (2010) obtiveram cinco componentes, que de forma acumulada explicaram 78,70% da variabilidade total dos dados. Miqueloni et al. (2012), utilizando a análise da variabilidade espacial para avaliar os fatores de perda de solo ao longo do relevo, concluíram que a análise de componentes principais, em conjunto com a geoestatística, permite a avaliação espacial da perda de solo e seus fatores e contribuiu para a análise integrada da atuação destes fatores ao longo do relevo da área, bem como do uso da terra.

A primeira componente principal (CP) (Eixo 1) apresentou correlação maior que 70% com seis dos nove atributos físicos analisados, enquanto que a segunda componente principal (Eixo 2) apresentou correlação elevada com um dos oito atributos analisados, sendo que o atributo AMF se correlacionou positivamente com a produtividade. Estes resultados corroboram com os obtidos por Alves et al. (2014), que encontram correlação positiva com areia e negativa com argila na CP (Eixo 1), e com Silva et al. (2010), que, ao analisarem os atributos químicos do solo utilizando geoestatística associada à análise multivariada, identificaram a primeira componente principal (Eixo 1) correlacionada com a acidez e a segunda (Eixo 2) com a matéria orgânica do solo.

Nos locais em que ocorreram maiores valores de Arg e DMP, menores foram os valores de ArgDisp, GF, AMF, AF, AM, AMG e AG, ou seja, ocorre uma correlação negativa, que pode ser justificada pelo fato de que as partículas de argila influenciam a formação da estrutura do solo como agente cimentante, interferem no fluxo e na qualidade da água superficial e subsuperficial, também no comportamento químico de nutrientes e elementos tóxicos. As menores taxas de produção para esse solo foram observadas onde a ArgDisp foi mais pronunciada.

A produtividade média obtida para a cultura do feijão foi de 1.537 kg ha⁻¹ (Tabela 2). Entretanto, os maiores valores de produtividade ocorreram nas áreas que apresentaram maiores valores de Arg, AMF e DMP, nas três profundidades estudadas, enquanto que os menores valores (< 857,6 kg ha⁻¹) foram observados onde ocorreram os maiores valores de AMG, AM e AG (Figura 2), que comprova que a taxa de produtividade nas escalas do terreno é influenciada pela movimentação das partículas do solo, comprovando a importância da estrutura do solo com relação a este parâmetro.

Para Bortoluzzi et al. (2008), a migração seletiva de partículas do solo é manifestada pelo movimento preferencial de partículas finas influenciadas pelo fluxo superficial de água e pela perda das partículas mais grosseiras. Para Oliveira et al. (2010), modificações na estrutura do solo desarranjam as partículas e a distribuição de poros, provocando a indisponibilidade de água e ar para o crescimento da planta.

A produtividade média obtida neste estudo foi 68% menor quando comparada aos valores observados por Dalchiavon et al. (2011), na região de Ilha Solteira-SP, em um Latossolo Vermelho, 40% menor que a média encontrada por Roque et al. (2008) em Campinas-SP. Contudo, o valor obtido está acima da média

nacional 1.110 kg ha⁻¹ e abaixo da média do Estado de Goiás de 2.313 kg ha⁻¹, na safra 2013/14 (CONAB, 2014).

4 Conclusões

As variáveis argila dispersa em água, areia fina, grau de flocculação e argila podem ser utilizadas em solos sob o mesmo sistema de manejo para identificar locais com diferentes potenciais de produtividade e mais afetados pela prática da irrigação.

As maiores produtividades do feijoeiro relacionaram-se com maiores teores de argila, areia muito fina e diâmetro médio ponderado de agregados nas três profundidades estudadas.

A análise geoestatística e multivariada mostram-se ferramentas eficientes na avaliação da variabilidade espacial dos atributos de solo.

Referências

- ALVES, S. M. F.; QUEIROZ, D. M.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 1, p. 22-30, 2014.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standart methods for the examination of water and wastewater*. 19. ed. Washington, DC., 2005. 953 p.
- APOLINO, J. N. S.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G.; LIMA, J. F. W. F. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas e uso de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 126-136, 2006.
- AZAMBUJA, A. V.; ROSA JUNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SERRA, A. P.; ROSA, C. B. C. J.; COTRIM, C. R. Influência da irrigação e culturas antecessoras em características físicas de um Latossolo Vermelho Distroférico e na cultura da soja. *Revista de Ciências Exatas e da Terra*, v. 1, n. 1, p. 9-20, 2012.
- BORTOLUZZI, E. C.; PERNES, M.; TESSIER, D. Mineralogia de partículas envolvidas na formação de gradiente textural em um argissolo subtropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 997-1007, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300009>.
- CAMPOS, C. C. M.; RIBEIRO, R. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; ALMEIDA, M. C. Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea terra firme na região de Humaitá (AM). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 325-336, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200002>.
- CASTIONE, G. A. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; CAMPOS, M. C. C. Variabilidade de atributos físicos e crescimento de raízes do feijoeiro sob irrigação por pivô central. *Revista de Ciências Agrárias (Belém)*, v. 58, n. 1, p. 58-68, 2015. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1550>.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. *Perspectivas para a agropecuária, safra 2014/2015; dezembro/2014*. Brasília: CONAB, 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_09_10_18_03_00_perspectivas_2014-15.pdf> Acesso em: 27 março 2014.
- 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*, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA; CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS - CNPS. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA-CNPS, 2011. 230 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013. 141 p.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society Agronomy, 1965. p. 499-510.
- KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography. *Crop Science*, v. 42, n. 3, p. 804-815, 2002. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2002.0804>.
- MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada espacial na estimativa de erodibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 6, p. 2175-2182, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600032>.
- MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P.; FERRAUDO, A. S. Análise espacial dos fatores da equação universal de perda de solo em área de nascentes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1358-1367, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900021>.
- OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; PEDROSA, E. M. R. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 9, p. 907-913, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000900001>.
- PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; TEIXEIRA, D. B.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J. Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 5, p. 1128-1135, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000500002>.
- POLYAKOV, V.; LAL, R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. *Environment International*, v. 30, n. 4, p. 126-136, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2003.10.011>. PMID:15031015.
- 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. 3, p. 1827-1835, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000500004>.
- SANTOS, D.; SOUZA, E. G.; NÓBREGA, L. H. P.; BAZZI, C. L.; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Variabilidade espacial de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 843-848, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000800005>.
- SCHMIDT, E. W.; VALIATI, M. I. Avaliação do manejo de irrigação para a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*) irrigada por pivô central na Agrícola Wehrmann em Cristalina - GO. *Revista Campo Digital*, v. 1, n. 1, p. 23-31, 2006.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Modificações na matriz de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 3, p. 554-562, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000300004>.
- SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 3, p. 963-970, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300026>.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 1, p. 15-22, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000100002>.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B.; PELUCO, R. G. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. *Geoderma*, v. 232-234, p. 172-182, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.037>.
- SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; CASTRO, S. S. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 6, p. 1012-1022, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000600018>.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférrico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004.
- STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; HEINEMANN, A. B.; OLIVEIRA, J. P. Correlação entre produtividade do feijoeiro no sistema orgânico e atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 19-25, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100003>.
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic Red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 925-933, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300034>.
- TORRES, J. L. R.; SANTANA, M. J.; PIZOLATO NETO, A.; PEREIRA, M. G.; VIEIRA, D. M. S. Produtividade de feijão sobre lâminas de irrigação e coberturas de solo. *Bioscience Journal*, v. 29, n. 4, p. 833-841, 2013.

Contribuição dos autores: Guilherme Adalberto Ferreira Castioni: Estudante do curso de doutorado em Engenharia Agrícola na FEAGRI, condutor do trabalho que resultou na sua Tese de Doutorado. Zigomar Menezes de Souza: Orientador do doutorando, Coordenador do projeto principal, responsável pela orientação do estudante. Reginaldo Barboza da Silva: Coorientador do doutorando, responsável pelo acompanhamento das coletas de campo, análises de laboratório, análise e interpretação dos resultados. Milton César Costa Campos: Colaborador responsável pela realização e interpretação das análises estatísticas, elaboração de tabelas, interpretações dos resultados, auxílio na redação e revisão do artigo. José Luiz Rodrigues Torres: Colaborador responsável pela interpretação das análises estatísticas, elaboração de tabelas, interpretações dos resultados, auxílio na redação final, revisão e encaminhamento do artigo.

Fonte de financiamento: CNPQ.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.