



ARTIGO ORIGINAL

Leandro da Silva Almeida^{1*}
Ednaldo Carvalho Guimarães¹

Geoestatística como ferramenta para o manejo sustentável da fertilidade do solo na cafeicultura

Geostatistics as a tool for the sustainable management of soil fertility in coffee growing

¹ Universidade Federal de Uberlândia – UFU,
Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa
Mônica, Bloco 1F, Sala 1F120, 38408-100
Uberlândia, MG, Brasil

*Autor Correspondente:
E-mail: almeidalean26@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Krigagem ordinária
Cafeicultura sustentável
Preservação ambiental
Planejamento de adubação

KEYWORDS

Ordinary kriging
Sustainable coffee farming
Environmental preservation
Fertilization planning

RESUMO: A cafeicultura é uma atividade agrícola de grande importância econômica e ambiental que hoje ocupa mais de 2,2 milhões de hectares no Brasil. O objetivo deste estudo foi verificar o comportamento espacial do pH e dos macronutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) no solo, buscando modelos geoestatísticos que permitissem o planejamento do uso de corretivos nas propriedades cafeeiras, de modo a tornar a atividade mais sustentável. O experimento foi realizado em uma área de 65 ha de cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.), localizada no município de Araguari, MG, utilizando uma malha de um ponto por hectare, totalizando 65 pontos georeferenciados. Foram ajustados os semivariogramas para os macronutrientes e o pH. Os dados foram interpolados *krigagem* por ordinária. Os modelos apresentados para os macronutrientes e pH trazem benefícios para a atividade cafeeira, permitindo, assim, fazer uso dos fertilizantes nos locais em que há realmente necessidade e conforme as quantidades mais adequadas. Pode-se, também, monitorar área com excesso de nutrientes, evitando-se assim contaminações dos recursos naturais.

ABSTRACT: *Coffee farming is an agricultural activity of great economic and environmental importance, today it occupies more than 2.2 million hectares in Brazil. The objective of this study was to verify the spatial behavior of pH and macronutrients: phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulfur (S) in soil searching for geostatistical models that allow a good planning of the use of correctives in coffee properties in order to make this the most sustainable activity. The experiment was carried out in an area of 65 ha of arabica coffee (Coffea arabica L.), located in the municipality of Araguari-MG, using a mesh of one point per hectare, totalizing 65 georeferenced points. The semivariograms were adjusted for macronutrients and pH. The data were interpolated by ordinary kriging. The models presented for macronutrients and pH bring benefits to coffee farming, thus making use of fertilizers in places where they are really needed and according to the appropriate quantities. One can also monitor the area with excess nutrients, thus avoiding contamination of natural resources.*

1 Introdução

O destaque da cafeicultura no contexto socioeconômico brasileiro está na sua amplitude, pois o café é cultivado em mais de 2,2 milhões de hectares no país, sendo que, desses, aproximadamente 80% são de cafeeiro arábica (CONAB, 2016). O Brasil, no ano de 2015, movimentou com a exportação de café mais de US\$ 5,555 milhões, terceiro produto agrícola nos valores de exportação (CONAB, 2016).

O cafeeiro brasileiro, nos últimos anos, passou a utilizar tecnologias que trazem impactos positivos para a produtividade e a qualidade do produto, aumentando sua competitividade (Bliska et al., 2009). Por ser uma cultura que apresenta elevado custo de produção, os cafeeiros estão sempre em busca da otimização dos custos, buscando alternativas que melhorem a relação custo/benefício (Carvalho et al., 2009). Dessa forma, para lograr sustentabilidade na atividade, o cafeeiro deve utilizar todos os avanços tecnológicos, necessita ter o domínio das tecnologias e de todas as atividades do agronegócio café.

Nessa busca, o emprego eficiente de adubos e corretivos, independentemente da origem, é um dos principais fatores para o incremento da produtividade na cultura (Lopes & Guilherme, 2007). No entanto, os pesquisadores frisam que o uso inadequado desses insumos pode causar reações adversas no ambiente, alterando seu equilíbrio, dependendo da qualidade e da quantidade de produto aplicada. Doses elevadas causam consumo excessivo de nutrientes pelas plantas e aumentam a disponibilidade dos elementos no sistema solo-água, levando a desequilíbrios ambientais (Almeida & Guimarães, 2016).

O comportamento dos atributos do solo pode ser determinado tanto por estatística clássica quanto por geoestatística, entretanto se os dados não revelam uma variação completamente aleatória, a geoestatística torna-se uma ferramenta imprescindível para descrever o comportamento desses atributos na área (Almeida & Guimarães, 2016). Ainda, segundo Mazion & Zimback (2011), a geoestatística é uma ferramenta imprescindível para trabalhar com dados de atributos que apresentam dependência espacial, pois ela permite compreender o comportamento dessa dependência quando se modelam os semivariogramas experimentais.

O objetivo deste estudo foi verificar o comportamento espacial do pH e dos macronutrientes: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) no solo, buscando modelos geoestatísticos que permitissem um planejamento adequado do uso de corretivos e fertilizantes na propriedade, contribuindo assim para o manejo sustentável na cafeicultura.

2 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Brasil, município de Araguari, MG, cujas coordenadas geográficas são: 18°32'55,99"S, 48°24'10,46"O. Na área de estudo são cultivados 65 hectares de café variedade Mundo Novo (*Coffea arabica* L.), plantados em 1989. A altitude é de 940 metros e o solo, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. Além disso, a área cultivada é irrigada por gotejamento, com uso de fertirrigação. O clima predominante da região é do tipo Cwa, ou seja, clima subtropical com inverno seco e verão quente, segundo a classificação climática de Köppen (1948).

O *grid* utilizado foi de um ponto por hectare, totalizando 65 pontos georeferenciados. As amostras de solo foram coletadas no mês de setembro de 2014, retiradas na profundidade de 0,00-0,20 m, respeitando-se a projeção do dossel do cafeeiro para a avaliação do pH e dos atributos químicos: fósforo disponível (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Os resultados das análises foram obtidos de acordo com a Embrapa (2011), sendo determinados: pH em água; fósforo extraído em ácido sulfúrico; potássio extraído com solução diluída de ácido clorídrico e posterior determinação por espectrofotometria de chama; Ca e Mg pela extração de solução KCl (1M); e o enxofre foi determinado pelo princípio de ataque da amostra com HCl, precipitação com BaCl₂, calcinação do BaSO₄ e determinação gravimétrica do precipitado. As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo (LABAS) da Universidade Federal de Uberlândia.

Foram calculadas as médias, medianas, variâncias, máximos e mínimos e desvios padrões dos atributos do solo analisados, a fim de se conhecer o comportamento geral dos dados e de se verificar possíveis valores atípicos. Além disso, foram gerados gráficos *box-plots* a fim de identificar *outliers*.

Foi realizada também análise descritiva espacial, verificando-se a tendência dos dados, por meio de gráficos de dispersão para as direções leste (x) e norte (y) de cada atributo do solo; também foram gerados mapas de localização dos pontos amostrais na área; e, por fim, os histogramas dos atributos, a fim de se verificar o comportamento de cada variável na área e a assimetria ou simetria dos dados, as quais podem interferir na modelagem espacial e no processo de interpolação pela *krigagem* (Yamamoto & Landim, 2013).

A modelagem dos semivariogramas foi realizada através da semivariância dos dados, que é uma medida de dissimilaridade dos dados. O cálculo foi realizado pela fórmula indicada por Matheron (1963), conforme apresentado na Equação 1.

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} * \sum^{N(h)} [Z(s) - Z(s+h)]^2 \quad (1)$$

em que: $\bar{\gamma}(h)$ é a semivariância para a distância h; N(h) é o número de pares da diferença da variável Z medida na posição s e s + h (posição + distância).

Os parâmetros do semivariograma foram estimados a sentimento, conforme proposto por Vieira et al. (1983), associados a validação cruzada, ou seja, foram ajustados vários modelos e verificada a qualidade dos ajustes por meio da validação cruzada, sendo selecionados aqueles que melhor representavam os atributos em campo. O processo de validação foi realizado conforme descrito em Soares (2006).

Após o ajuste do modelo teórico do semivariograma, avaliou-se o grau de dependência espacial, de acordo com o proposto por Cambardella et al. (1994), conforme Equação 2.

$$GD = \frac{Co}{Co + C} \quad GD = \frac{Co}{Co + C} \quad (2)$$

em que: GD = grau de dependência espacial; Co = efeito pepita; C = contribuição (Co + C = patamar); sendo: GD < 0,25 = Forte; ≥ 0,25 GD ≤ 0,75 = Moderada e GD > 0,75 = Fraca.

Após essas verificações dos atributos químicos do solo que apresentaram dependência espacial aplicou-se a *krigagem* ordinária para a interpolação (Yamamoto & Landim, 2013).

Todas as análises geoestatísticas foram realizadas com o auxílio do programa R versão 3.2.1 (R Development Core Team, 2015), utilizando-se o pacote de dados geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2006).

Para a divisão das faixas de manejo, obtidas nos mapas temáticos, foram utilizados os critérios relativos a cada atributo do solo, conforme proposto por Alvarez et al. (1999) no Manual de Recomendações do Uso de Fertilizantes e Corretivos em Minas Gerais (5ª Aproximação).

3 Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas descritivas do pH e dos macronutrientes referentes ao solo da Fazenda Brasil no ano de 2014. Também foi observada a presença de valores discrepantes (*outliers*) que poderiam comprometer as análises pois, segundo Mingoti & Rosa (2008), quando um conjunto de dados apresenta discrepância ou valores extremos pode ocorrer o comprometimento da estimativa dos semivariogramas, distorcendo-se dessa forma as análises. Os pesquisadores reforçam ainda que a presença de um único *outlier* pode comprometer as análises.

O valor médio do pH em água do solo de 5,8 é classificado como um nível bom agronomicamente, entretanto o valor máximo de 6,78 é considerado um pH alto, nível no qual haverá deficiência de micronutrientes, e o valor mínimo de 5,14 é considerado baixo, no qual há presença de alumínio tóxico nas raízes do cafeeiro (Ribeiro et al., 1999; Vendrame et al., 2007).

Os valores médios dos macronutrientes P, K e S do solo são considerados muitos bons (altos), já os teores do Ca e do Mg do

solo são considerados médios, de acordo a tabela de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais (Ribeiro et al., 1999).

Na análise descritiva espacial foram elaborados os mapas de distribuição dos elementos na área do estudo e também a verificação de tendência dos dados nas direções leste (x) e norte (y) e o histograma do conjunto de dados (Figura 1). Os histogramas são importantes na escolha do método de cálculo, conforme relatam Yamamoto & Landim (2013).

A estatística do quartil (Q1, Q2 e Q3) e os gráficos de dispersão possibilitaram verificar se os atributos do solo apresentavam comportamentos semelhantes em algum ponto da área, ou seja, tendência. A tendência não inviabiliza a análise geoestatística, entretanto seria necessária uma transformação dos dados para se executar a análise (Soares, 2006). Observe-se, na Figura 1, que os quartis estão distribuídos em toda a área e os gráficos de dispersão dos valores em relação a X e em relação a Y indicam não ocorrer tendência significativa nos dados. Os histogramas mostram, nesses casos, que não ocorre assimetria acentuada para essas variáveis. Esses fatos sugerem a não necessidade de transformação de dados para a aplicação da metodologia de análise geoestatística usando o estimador de Matheron (Viera et al., 1983).

Para cada um dos atributos do solo foram ajustados os modelos de semivariogramas cujos modelos finais estão apresentados na Figura 2, sendo que todos foram ajustados a sentimento e escolhidos aqueles que apresentaram melhores parâmetros quando avaliados pela validação cruzada, conforme indicam Vieira et al. (1983) e Yamamoto & Landim (2013). Os parâmetros dos ajustes dos modelos dos semivariogramas são apresentados na Tabela 2.

Observe-se, na Tabela 2, que o atributo do solo pH apresentou forte grau de dependência espacial ($GD < 0,25$); os demais atributos desse grupo foram considerados de moderada

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo com cultura de café da Fazenda Brasil, município de Araguari, MG, no ano de 2014.

Table 1. Descriptive statistics of soil attributes with the farm café culture Brazil, municipality of Araguari-MG, in the year 2014.

Atributos	Unidade	Média	Mediana	DP	Var	Máx	Min
pH em água (pH)		5,98	6,03	0,35	0,13	6,78	5,14
P	mg dm ⁻³	95,99	80,99	40,91	1673,46	164,37	39,75
K	mg dm ⁻³	203,05	178,00	77,47	6002,20	359,00	95,00
S	mg dm ⁻³	28,15	23,57	14,53	211,26	74,54	8,68
Ca	cmol _c dm ⁻³	2,13	2,10	0,39	0,15	3,00	1,10
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,64	0,60	0,13	0,02	0,90	0,30

DP = desvio padrão; Var = variância; Máx = máximo; Min = mínimo.

Tabela 2. Modelos, parâmetros, relação Co/C_o + C e grau da dependência espacial dos semivariogramas ajustados para a acidez do solo, matéria orgânica e macronutrientes.

Table 2. Models, parameters, Co / Co + C ratio and degree of spatial dependence of semivariograms adjusted for soil acidity and macronutrients.

Atributos	Modelos	C	Co	Alcance	Co/Co + C	GD
pH	Gaussiano	0,14	0,03	575,99	0,18	Forte
P	Gaussiano	1.392,62	666,04	575,99	0,32	Moderado
K	Gaussiano	1.548,48	985,40	346,13	0,39	Moderado
S	Esférico	56,43	60,46	374,12	0,52	Moderado
Ca	Gaussiano	0,07	0,07	647,53	0,50	Moderado
Mg	Gaussiano	0,005	0,01	458,49	0,56	Moderado

Co = efeito pepita; C = contribuição; Co + C = patamar; GD = grau de dependência.

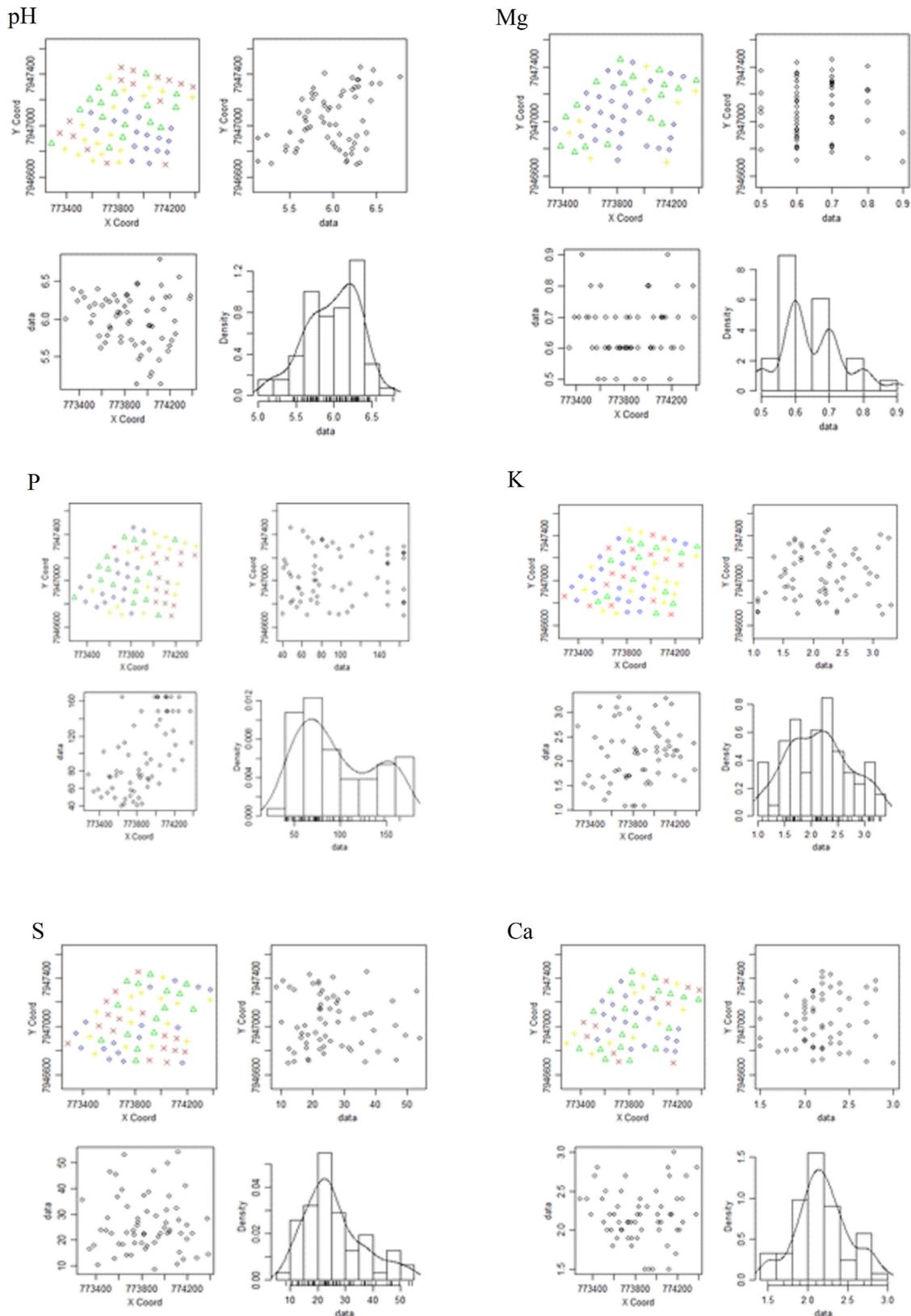


Figura 1. Gráficos de posição dos pontos amostrados de acordo com os quartis (classes definidas na sequência de tamanhos das representações: Min |-- Q1; Q1 |-- Q2; Q2 |-- Q3; Q3 |-- Max), dispersão sentido x e y e histograma do pH e dos macronutrientes: pH; (Mg) magnésio; (P) fósforo; (K) potássio; (S) enxofre; e (Ca) cálcio.

Figure 1. Position graphs of the points sampled according to the quartiles (classes defined in the size sequence of the representations: Min | - Q1; Q1 | - Q2; Q2 | - Q3; Q3 | - Max). X and y sense dispersion and histogram of pH and macronutrients.

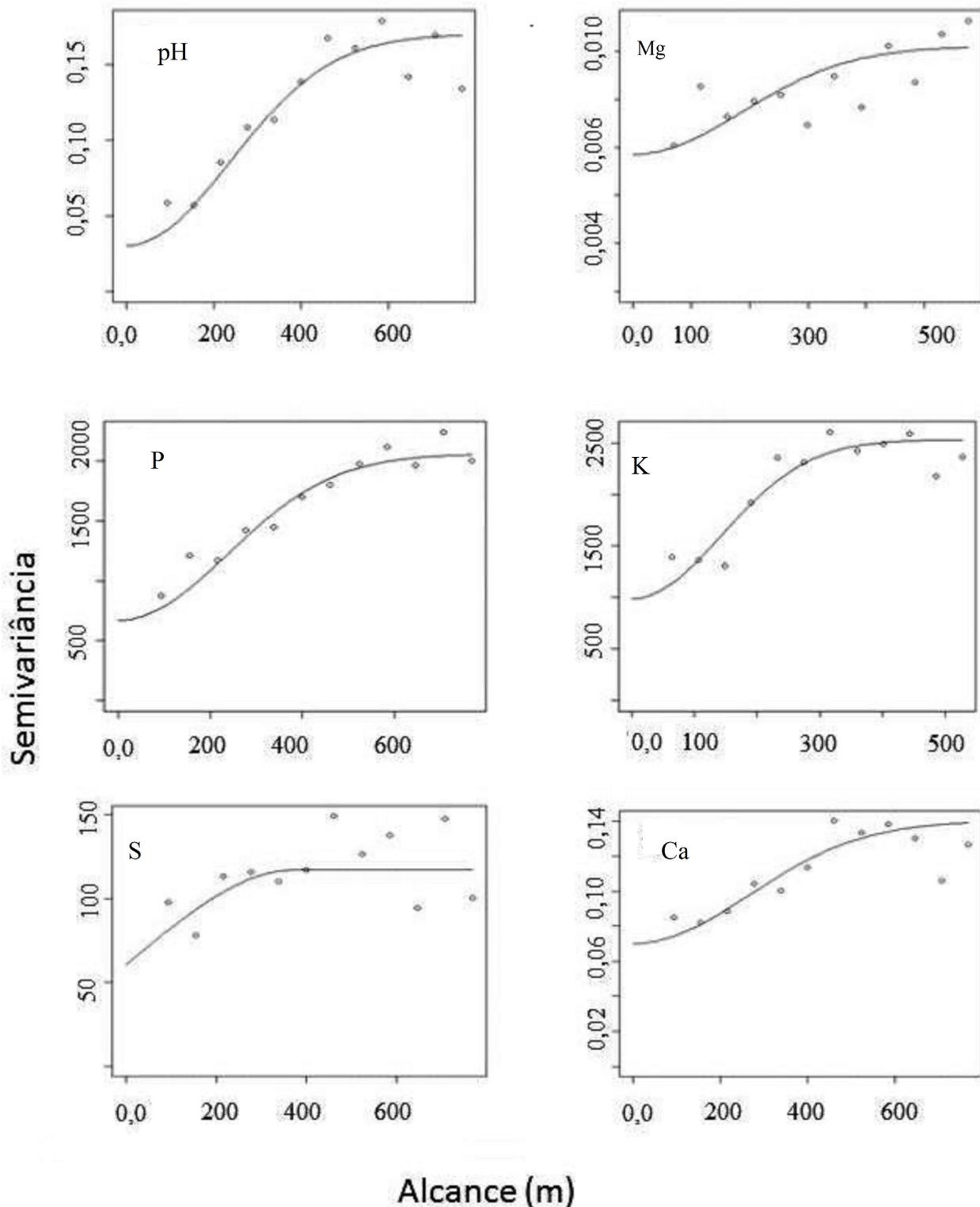


Figura 2. Semivariogramas ajustados para pH e macronutrientes do solo.
Figure 2. Semivariograms adjusted for soil pH and macronutrients.

dependência espacial ($0,25 < GD < 0,75$). Observe-se ainda que o alcance real máximo foi do Ca, de 647,53 UTM, e o mínimo, do potássio, de 346 UTM. Baixos valores de alcance podem influir negativamente na qualidade das estimativas, uma vez que poucos pontos são usados para realização da

interpolação na estimativa de valores em locais não medidos (Lima et al., 2010).

O modelo gaussiano foi o modelo de semivariograma que mais explicou, com maior frequência, o comportamento espacial dos macronutrientes neste estudo (Tabela 2), à exceção

do enxofre (S), cujo melhor modelo ajustado foi o esférico. Esses resultados diferem dos resultados encontrados por Oliveira et al. (2009), Sanchez et al. (2005) e Santos et al. (2015) trabalhando com geoestatística com as culturas citros, café arábica e café conilon, respectivamente, que ajustaram preferencialmente o modelo esférico aos atributos químicos dos solos analisados.

É importante que se aprimorem as metodologias de avaliação dos atributos químicos do solo levando-se em consideração a dependência espacial das variáveis, como com o uso de técnicas como a geoestatística (Almeida & Guimarães, 2016). Estudos recentes discutem essa necessidade na atividade cafeeira (Almeida & Guimarães, 2016; Ferraz et al., 2012; Lima et al., 2013; Santos et al., 2015; Silva et al., 2007, 2010;

Silva & Lima, 2012). Na Figura 3 são apresentados os mapas temáticos de distribuição do pH e dos macronutrientes na área.

No mapa temático do pH (Figura 3) pode ser observada uma pequena faixa mais escura na qual há necessidade de correção do solo nesse ano ($\text{pH} < 5,5$), e tem-se duas faixas de pH entre 6,0 e 6,5 e uma faixa central de pH entre 5,5 e 6,0 nas quais, a princípio, não há necessidade de correção nesse ano, entretanto são zonas de monitoramento mais constante, já que o pH está mais próximo do limite de intervenção.

Os atributos do solo P, K e S estão divididos em áreas de manejo, entretanto para esses elementos, na área estudada, essa divisão é importante para o monitoramento pois, devido ao longo tempo utilizando-se adubações convencionais na atividade cafeeira, os teores desses elementos no solo encontram-se em

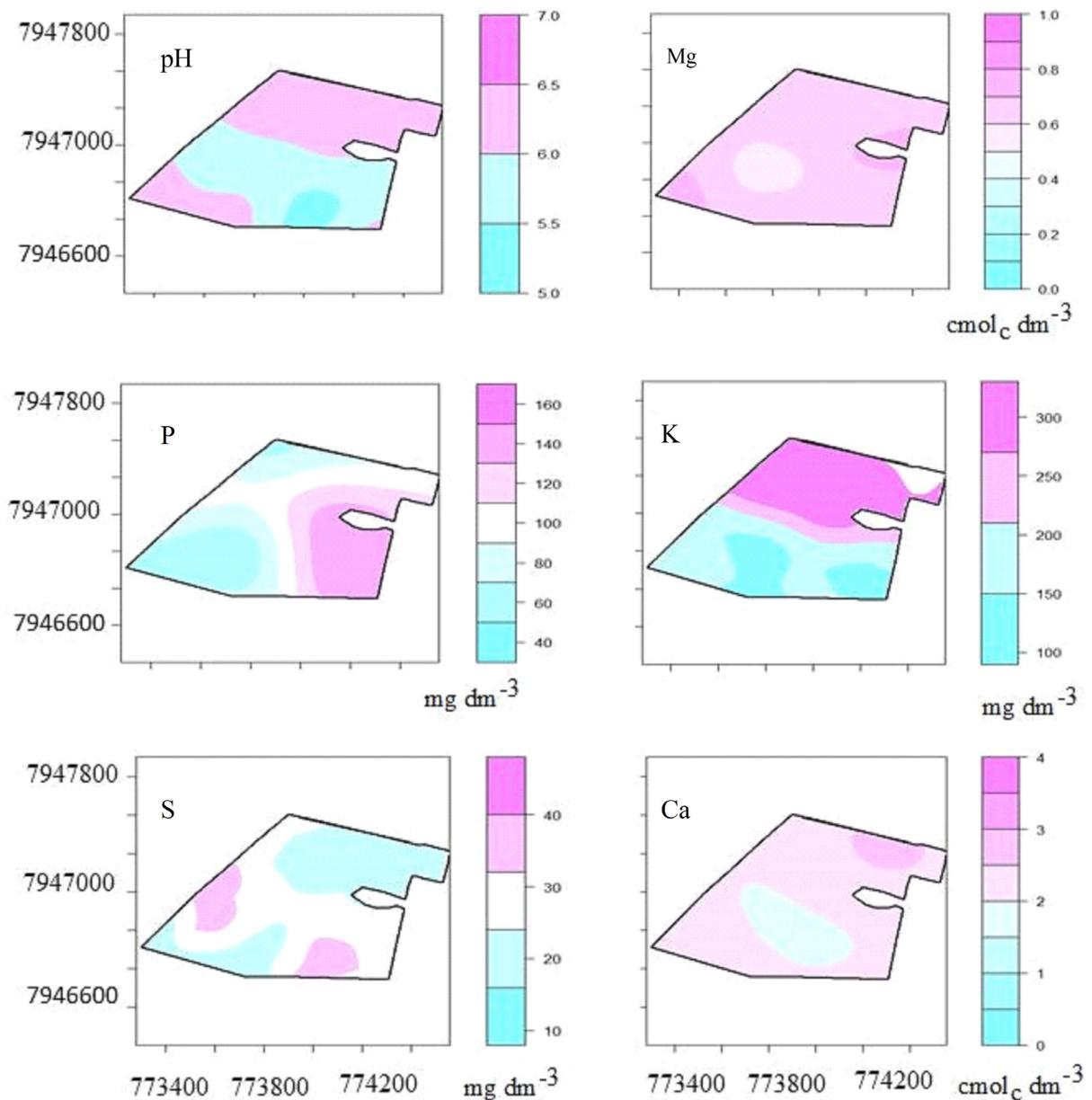


Figura 3. Mapas temáticos ajustados para pH e macronutrientes.

Figure 3. Thematic maps adjusted for pH and macronutrients.

níveis considerados muito bons (altos), ou seja, a área necessita apenas de adubações para suprir a exportação desses nutrientes.

Importante ainda se observar, na Figura 3, que o valor limite para o teor de P ser considerado muito bom é de 18 mg/dm³. No solo estudado, a zona mínima de fertilidade do P está acima de 30 mg/dm³ desse elemento, sendo que o solo ainda apresenta uma faixa acima de 150 mg/dm³. Valores altos também são encontrados para K e S, cujos limiares de muito bom são, respectivamente, 120 mg/dm³ e 10 mg/dm³ – no solo, as faixas já se iniciam acima. Os atributos Mg e Ca, apresentam-se bastante constantes no solo, com apenas pequenas manchas, entretanto com pouca variabilidade entre elas.

As faixas de manejo propostas por este trabalho são de fundamental importância para o aprimoramento do uso de fertilizantes agrícolas, buscando-se uma aplicação mais localizada de acordo com a necessidade de cada faixa de solo dentro da propriedade e de acordo com a sua capacidade de retenção, pois os impactos decorrentes do uso incorreto dos fertilizantes são muitos.

O primeiro impacto ao ambiente está na produção de fertilizantes, por exemplo, Tallaksen et al. (2015) afirmam que a transformação do nitrogênio atmosférico (N₂) para uma forma possível de uso agrícola requer muita energia. Atualmente a produção de fertilizantes nitrogenados é responsável pela demanda primária de 1,2% da energia mundial (Tallaksen et al., 2015). No mundo, cerca de 110 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados são usados todos os anos e a demanda tem previsão de crescer de 1% a 1,5% ao ano durante os próximos 5 anos (Heffer & Prud'homme, 2013).

O segundo efeito a ser considerado, que está diretamente associado ao primeiro (grande demanda de energia), é o aumento na emissão dos gases de efeito estufa, já que a energia demandada normalmente para a produção de fertilizantes, atualmente, é baseada em matriz fóssil. Avaliações dos ciclos agrícolas têm documentado que os fertilizantes contribuem significativamente para a produção de gás do efeito estufa (Tallaksen et al., 2015).

O terceiro impacto importante pode ser observado na extração de minerais: a atividade mineradora tem deixado muitos impactos de longo prazo, sociais e ambientais, inaceitáveis em muitas partes do mundo. Esses impactos variam de deslocamento geográfico e cultural de comunidades indígenas a contaminação de água, ar e terra com subprodutos tóxicos de extração e processamento não suficientemente bem contidas e/ou tratadas (Moran et al., 2014).

O quarto impacto a ser considerado é a contaminação da água e do solo devidas à aplicação desses fertilizantes pela agricultura, pois o solo funciona como um reservatório com grande capacidade de reter e complexar elementos químicos, mas sua capacidade de suporte é limitada e esse limite precisa ser determinado para cada elemento estranho introduzido. A extrapolação dos limites de suporte do solo é que dá origem aos principais problemas de ordem físico-química do solo (Andrade et al., 2009). Pelos processos erosivos, as águas superficiais são enriquecidas com nutrientes, principalmente N e P, que provocam a eutrofização (Mota & Sperling, 2009).

Nesse sentido, as perdas de nutrientes provenientes da agricultura são um dos principais constituintes da poluição da água. Os custos da poluição da água proveniente da agricultura

para a sociedade podem incluir, além dos danos ambientais e aos ecossistemas, a redução na renda da agricultura, aquicultura e pesca e o aumento dos custos de tratamento de água potável (Smith & Siciliano, 2015).

As observações realizadas neste estudo por meio dos mapas temáticos mostram que, no geral, os elementos estão dentro do recomendado para a cafeicultura, entretanto com áreas que ou necessitam de complementação ou estão com teores acima dos limites. Esse fato leva a crer que, no caso de uma aplicação, pela média, pode-se ter excessos, os quais podem vir a contribuir para os danos citados além, é claro, para uma menor rentabilidade do produtor.

4 Conclusões

Todos os atributos químicos do solo estudados, exceto o pH, apresentaram dependência espacial moderada, já o pH apresentou forte dependência espacial.

À exceção do enxofre (S), para o qual o modelo de semivariograma ajustado foi o modelo esférico, para os demais macronutrientes e o pH o modelo ajustado foi o gaussiano.

A geoestatística contribui assim significativamente para o planejamento de adubação das propriedades, possibilitando melhor aproveitamento dos fertilizantes e colaborando para uma atividade agrícola sustentável e rentável.

Referências

- ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. *Coffee Science*, v. 11, n. 2, p. 195-203, 2016.
- ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. F. Interpretação dos resultados das análises dos solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. cap. 5, p. 25-32.
- ANDRADE, M. G.; MELO, V. F.; SOUZA, L. C. P.; GABARDO, J.; REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: II - formas e disponibilidade para plantas. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 33, n. 6, p. 1889-1898, 2009.
- BLISKA, F. M. M.; VEGRO, C. L. R.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; MOURÃO, E. A. B.; CARDOSO, C. H. S. Custos de produção de café nas principais regiões produtoras do Brasil. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 29, n. 8, p. 5-20, 2009.
- 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 America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1240-1248, 1994.
- CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; BARTHOLO, G. F.; PEREIRA, A. A.; NOGUEIRA, Â. M.; CARVALHO, A. M. Comportamento de progênies F4 obtidas por cruzamentos de 'Icatu' com 'Catimor'. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 33, n. 1, p. 47-52, 2009.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. *Estimativas de safras agrícolas*. Levantamento Café. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 6 jan. 2016.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Manual de métodos de análises de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011. 230 p.
- FERRAZ, G. A. E S.; SILVA, F. M.; CARVALHO, L. C. C.; ALVES, M. C.; FRANCO, B. C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. *Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012.
- HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. *Fertilizantes Outlook 2013-2017*. Paris: Internacional Fertilizer Industry Association (IFA), 2013.
- KÖPPEN, W. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*: Fondo de Cultura Económica. México: Editora, 1948. 479 p.
- LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 1, p. 16-23, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902013000100003>.
- LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. *Revista Árvore*, v. 34, n. 1, p. 127-136, 2010.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do Solo e Produtividade Agrícola. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J. C. L. (Eds.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 1-64.
- MANZIONE, R. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial multivariada aplicada na avaliação da fertilidade do solo. *Engenharia na Agricultura*, v. 19, n. 3, p. 227-235, 2011.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- MINGOTI, S. A.; ROSA, G. A note on robust and non-robust variogram estimators. *Revista Escola de Minas (REM)*, v. 61, n. 1, p. 87-95, Mar. 2008.
- MORAN, C. J.; LODHIA, S.; KUNZ, N. C.; HUISINGH, D. Sustainability in mining, minerals and energy: new processes, pathways and human interactions for a cautiously optimistic future. *Journal of Cleaner Production*, v. 84, n. 1, p. 1-15, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.016>.
- MOTA, F. S. B.; SPERLING, M. *Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 428p.
- OLIVEIRA, P. C. G.; FARIAS, P. R. S.; LIMA, H. V.; FERNANDES, A. R.; OLIVEIRA, F. A.; PITA, J. D. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo e da produtividade de citros na Amazônia Oriental. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 708-715, dez. 2009.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: *A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 4 nov. 2015.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. *R-NEWS*, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2006.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000400008>.
- SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B.; DRUMONT, A. P. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. *Revista Ciência Agronômica, Fortaleza*, v. 46, n. 3, p. 469-476, 2015.
- SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; MARQUES JÚNIOR, J.; MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. *Ciência Rural*, v. 37, n. 2, p. 401-407, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000200016>.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 467-474, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200016>.
- 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.
- SMITH, L. E. D.; SICILIANO, G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 209, n. 1, p. 15-25, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.016>.
- SOARES, A. *Geoestatística para ciências da terra e do ambiente*. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2006. 2014 p.
- TALLAKSEN, J.; BAUER, F.; HULTEBERG, C.; REESE, M.; AHLGREN, S. Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production. *Journal of Cleaner Production*, v. 107, n. 16, p. 626-635, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.130>.
- VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, v. 31, n.3, p. 1-75, 1983.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina Textos. 2013. 215 p.

Contribuição dos autores: Leandro da Silva Almeida conduziu a pesquisa e a escrita científica; Ednaldo Carvalho Guimarães contribuiu com a orientação da pesquisa, escrita científica e revisão do texto.

Fonte de financiamento: Não houve fontes de financiamento.

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