

VARIABILIDADE ESPACIAL DA DOSE DE P_2O_5 E K_2O PARA ADUBAÇÃO DIFERENCIADA E CONVENCIONAL EM LAVOURA CAFEIEIRA

Gabriel Araújo e Silva Ferraz¹, Fábio Moreira da Silva², Marcelo Silva de Oliveira³,
Rogner Carvalho Avelar⁴, Ronan Souza Sales⁵

(Recebido: 17 de setembro 2014 ; aceito: 01 de dezembro de 2014)

RESUMO: Poucos estudos foram realizados acerca da variabilidade espacial de doses de insumos, principalmente realizando-se o comparativo entre o manejo convencional e o baseado em agricultura de precisão, em cafeicultura. Objetivou-se, no presente trabalho, caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos químicos do solo, bem como da recomendação de aplicação de fertilizantes numa lavoura cafeeira, realizando o mapeamento destas variáveis, para visualizar sua distribuição espacial. Objetivou-se ainda comparar a recomendação de aplicação de fertilizantes baseados na amostragem convencional e na amostragem em malha quadrada, para cafeicultura de precisão, de forma a demonstrar as vantagens do uso desta forma de manejo da lavoura. Este trabalho foi conduzido na fazenda Brejão, no município de Três Pontas, Minas Gerais, utilizando-se os atributos químicos do solo, fósforo e potássio, amostrados de forma convencional e em malha amostral quadrada de 64 pontos, georreferenciados. As amostras de solo foram enviadas a um laboratório de análise de solo para que se pudessem obter os teores dos elementos químicos, possibilitando a realização da recomendação de aplicação de fertilizantes. A análise destes dados, por meio das técnicas geoestatísticas, possibilitou caracterizar a variabilidade espacial do fósforo e do potássio, bem como da dose de P_2O_5 e K_2O recomendada pela amostragem em malha quadrada, permitindo o mapeamento destas variáveis. Foi possível identificar as diferenças apresentadas pela dosagem de P_2O_5 e K_2O baseadas nas recomendações obtidas pela amostragem convencional e pela amostragem em malha quadrada, para cafeicultura de precisão.

Termos para indexação: Agricultura de precisão, geoestatística, fertilizantes, cafeeiro.

SPATIAL VARIABILITY OF THE DOSAGE OF P_2O_5 AND K_2O TO FERTILIZE IN A VARIABLE RATE AND IN A CONVENTIONAL WAY IN A COFFEE FIELD

ABSTRACT: Fewer studies have been conducted on the spatial variability of inputs dosage in crop field, mainly when it has been performed the comparison between conventional management and precision agriculture management in coffee crop. The aim of this article was to characterize the structure and magnitude of the spatial distribution of soil chemical attributes, and the recommendation of fertilizer application on a coffee field, and map these variables in order to identify the spatial dependence of them. It was also aimed compare the recommendation of fertilize application based on conventional sampling method and based on grid sampling method to demonstrate the advantages of the use of this crop management. This study was carried out at the Brejão farm in Três Pontas, Minas Gerais state, Brazil. As data base were used phosphorus and potassium sampled conventionally and sampled in a 64 point squared grid. The soil sampling was sent to a soil lab to proceed the analyses of the amount of chemical attributes present in the soil, that allowed to proceed the recommendation of fertilizer application. The analysis of these data by geostatistics tools allowed characterize the spatial variability of phosphorus and potassium, as well as, the dose of P_2O_5 and K_2O recommended by the grid sampling method which allowed creating maps of spatial distribution of these variables. It was possible to identify differences presented in the P_2O_5 and K_2O doses based on the recommendations obtained by the conventional sampling method and by the grid sampling method to precision coffee culture.

Index terms: Precision agriculture, geostatistics, fertilizers, coffee plant.

1 INTRODUÇÃO

Uma das necessidades da agricultura moderna é a predição da variabilidade espacial dos atributos do solo, em escalas mais detalhadas para o gerenciamento sustentável e otimização das práticas de manejo (KORSAETH; RILEY, 2006). Segundo Corá et al. (2004) e Grego e Vieira (2005), o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é

considerado como princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala.

Amado et al. (2009) citam que a coleta de amostras de solo georreferenciadas permite espacializar os atributos químicos, com o auxílio das ferramentas de geoestatística, sendo frequentemente utilizada, visando identificar zonas com restrições químicas, que possam limitar o rendimento da cultura. Ao se identificarem

^{1,2,5}Universidade Federal de Lavras/ULFA - Departamento de Engenharia/DEG - 37200-000 -Lavras - MG - gabriel.ferraz@ufla.br, famsilva@ufla.br, ronan_sales@hotmail.com

³Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Ciências Exatas/DEX- 37200-000 Lavras - MG - marcelo.oliveira@dex.ufla.br

⁴Cooperativa dos Cafeicultores do Cerrado Monte Carmelo LTDA - Rodovia MG 190, Km 4 - 38500-000 - Monte Carmelo-MG avelarcafe@yahoo.com.br

estas restrições, passa-se para a etapa de correção destas distorções presentes na área. Assim, surge a aplicação de insumos à taxa variável, que segundo Yuan et al. (2010), é uma parte importante da agricultura de precisão, pois preconiza a aplicação de insumos, em níveis específicos, adequados à área de gestão. Bernardi et al. (2004) citam que a adubação a taxas variáveis tem potencial para otimizar o uso de fertilizantes, minimizar os impactos negativos da atividade agrícola no ambiente, uniformizar a produtividade de uma área e reduzir os custos com fertilizantes.

Oliveira et al. (2008), em seus estudos, constataram que a aplicação de corretivos e fertilizantes utilizando-se taxas variáveis, em regiões específicas no solo, possibilitou minimizar os custos de produção e melhorar a eficiência do uso dos insumos agrícolas em lavoura cafeeira. De acordo com Molin et al. (2010), uma área cafeeira que recebeu aplicações de fertilizantes fosfatados e potássicos à taxas variadas, apresentou um aumento na produtividade, quando comparados com uma área que recebeu adubação em taxas fixas, além de apresentarem redução de consumo de insumos. Ferraz et al. (2011) constataram que a aplicação de insumos à taxa variável pode contribuir para a redução de custos de produção em cafeicultura.

Muitos trabalhos encontrados na literatura enfocam no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, da planta e infestações de pragas (ALVES et al., 2009; CARVALHO et al., 2013; FERRAZ et al., 2012a, 2012b, 2012c; MOLIN et al., 2010; SILVA, A. et al., 2010; SILVA, F. et al., 2007, 2008, 2010) em lavoura cafeeira. Alguns trabalhos estudam também a necessidade de aplicação de insumos, assim como os estudos de Barbieri, Marques Júnior e Pereira (2008) e Weirich Neto, Sverzut e Schimadeiro (2006). Porém, estes trabalhos foram feitos em culturas como cana-de-açúcar e milho. Poucos são os trabalhos que estudam a dosagem de insumos, principalmente quando se trata de cafeicultura, em que este número fica ainda mais reduzido, tendo apenas como estudo o trabalho de Oliveira et al. (2008), em área cultivada com café conilon e o trabalho de Molin et al. (2010).

A adoção da agricultura de precisão, mesmo já sendo uma realidade na cafeicultura, ainda se encontra em um estágio muito inicial. Os cafeicultores ainda necessitam de maiores fontes de informação e pesquisa para que possam migrar do sistema convencional de manejo, para o sistema baseado na agricultura de precisão. Sendo assim, a

realização de trabalhos que façam um comparativo entre estas técnicas é de fundamental importância para a difusão da agricultura de precisão entre os produtores.

Objetivou-se, neste trabalho, utilizar a geoestatística para caracterizar a estrutura e a magnitude da distribuição espacial de atributos químicos do solo (fósforo e potássio), bem como da recomendação de aplicação de P₂O₅ e K₂O, em lavoura cafeeira e mapear estas variáveis de forma a visualizar sua distribuição espacial, permitindo a utilização dos dados para a realização de adubação à taxas variadas. Objetivou-se, também, realizar a comparação entre a recomendação de aplicação de fertilizantes baseados na amostragem convencional e na amostragem em malha quadrada, para cafeicultura de precisão, de forma a demonstrar a importância do uso desta técnica, para a cultura do cafeeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais, em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) da cultivar Topázio transplantada, em dezembro de 2005, no espaçamento de 3,8m entrelinhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3289 plantas.ha⁻¹. As coordenadas geográficas do ponto central da área são de 21°25'58" de latitude sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich. Os pontos limites da área foram obtidos por meio do uso de GPS topográfico.

O clima do local é caracterizado como ameno, tropical de altitude, com temperaturas moderadas, verão quente e chuvoso, classificado por Köppen como Cwa. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso.

Foram realizadas nesta área, em julho de 2011, duas formas de amostragem do solo: a convencional e a em malha amostral quadrada. Para ambos os tipos de amostragem, foram avaliados os seguintes atributos químicos do solo: disponibilidade de Fósforo (P) (Extrator Mehlich 1) e disponibilidade de Potássio (K) (Extrator Mehlich 1). As amostras de solo compostas foram enviadas para o laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciências dos Solos da Universidade Federal de Lavras, para se procederem às devidas análises dos atributos do solo.

Para amostragem convencional, a coleta de solo foi realizada com trado holandês, na profundidade de 0 – 20 cm, na projeção da saia da planta de cafeeiro, retirando-se 10 subamostras aleatórias para cada 11 ha, homogeneizando-as e obtendo apenas uma amostra composta. Assim, obtiveram-se duas amostras compostas para a área em estudo, o que fez com que esta fosse dividida ao meio, (Lado A e Lado B) (Figura 1).

Para a realização da amostragem em malha, demarcou-se, na área em estudo, uma malha amostral regular de, aproximadamente, 3 pontos por hectare. Isto foi realizado para que se conseguisse uma boa amostragem da área, além

de se proceder a uma amostragem melhor da que é realizada na prática em cafeicultura. De acordo com Ferraz et al. (2012b), a malha amostral mais utilizada comercialmente na cafeicultura é a de um ponto, a cada hectare. Sendo assim, utilizou-se uma malha de 57 x 57 m, totalizando 64 pontos amostrais georreferenciados (2,9 pontos por hectare), que foi demarcada com a utilização do GPS topográfico, cujo erro médio era de 10 cm (Figura 2).

Cada ponto amostral corresponde a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros, onde o ponto foi georreferenciado e as outras duas plantas localizadas em cada rua lateral ao ponto de referência (Figura 2).

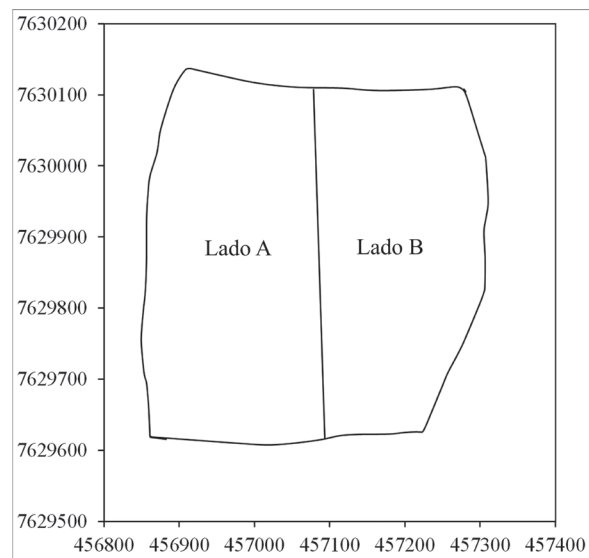


FIGURA 1 - Divisão da área para a amostragem convencional.

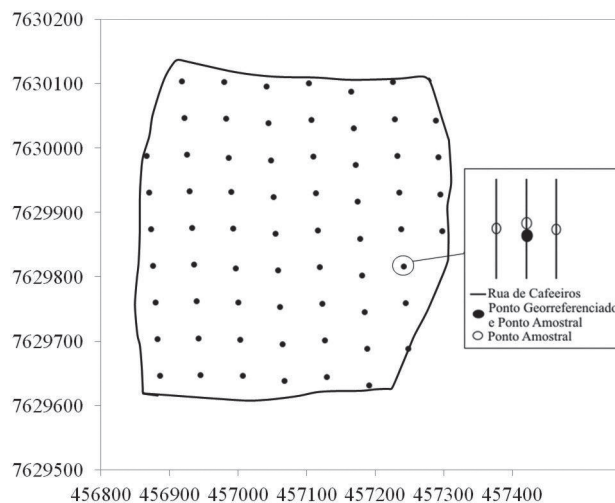


FIGURA 2 - Malha Amostral e detalhamento da amostragem.

A coleta dos atributos químicos do solo foi realizada por meio da retirada de subamostras na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade, com o uso de um trado holandês. Em cada ponto amostral foi retirada uma subamostra de cada uma das quatro plantas que compõem este ponto. As quatro subamostras, de cada ponto amostral, foram homogeneizadas para formar uma amostra composta para este ponto.

No intuito de caracterizar a estrutura e a magnitude da dependência espacial dos atributos do solo P e K e da recomendação de P₂O₅ e K₂O, foram realizados os ajustes de semivariograma, cuja semivariância é estimada pela equação 1:

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

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. Z é o atributo em estudo. x_i é a posição georreferenciada em que ocorreu a variável (atributo) Z. 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 denominado de efeito pepita (C₀); patamar (C₀+C₁); e o alcance (a) (BACHMAIER; BACKERS, 2008).

Foi utilizado o método dos quadrados mínimos ordinários para este ajuste de um modelo matemático. De acordo com Bussab e Moretin (2002), este estimador é um dos mais utilizados em estudos estatísticos. Trata-se, também, de um método utilizado em diversos trabalhos na cultura do cafeeiro (FERRAZ et al., 2012a; SILVA et al., 2007, 2008).

Segundo Mello et al. (2005), o método dos quadrados mínimos ordinários consiste em obter os valores dos parâmetros de um modelo que minimizam a soma do quadrado da diferença entre os valores observados e os estimados. Ainda de acordo com estes autores, a estimativa dos parâmetros do semivariograma por este método pode ser obtida pela minimização da equação 2:

$$Q(\theta) = \sum_{i=1}^K [g(h_i) - \gamma(h_i; \theta)]^2 \quad 2$$

onde, θ representa o vetor de parâmetros estimados que definem completamente o semivariograma (C₀, C₁, a), sendo cada estimativa denotada por g(h), k é ao número de "lags" do semivariograma experimental.

A quantidade $\gamma(h_i; \theta)$ é a semivariância calculada pelo modelo e depende dos parâmetros estimados θ e após minimização, a função g(h) se torna a estimativa de quadrados mínimos.

O modelo matemático para semivariogramas escolhido foi o esférico, para todos os atributos estudados. Este modelo é muito utilizado em trabalhos de estudo de variabilidade espacial em lavouras cafeeiras de atributos do solo, produtividade, desfolha, força de desprendimento de frutos e infestação de praga (ALVES et al., 2009; FERRAZ et al., 2012a, 2012b; MOLIN et al., 2010; SILVA, A. et al., 2010; SILVA, F. et al., 2007, 2008, 2010). Ferraz et al. (2012c), estudando diferentes métodos e modelos, constatou que o modelo esférico foi o que se ajustou à maioria dos atributos do solo e à produtividade do cafeeiro. Pode-se explicar sua ampla utilização, devido à sua capacidade, relativamente fácil, de ajuste a qualquer nuvem de pontos que tenha um patamar. O modelo esférico é dado como segue:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h = 0 \\ C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } 0 < h \leq a \\ C_0 + C_1 & \text{se } h > a \end{cases} \quad 3$$

Após o ajuste dos semivariogramas foi realizada a interpolação dos dados por krigagem ordinária, de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial das variáveis na lavoura.

A krigagem é o método de interpolação da Geoestatística, que utiliza a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Estas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos seja nula, e a condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor estimado e o medido, essas diferenças são mínimas (BURGESS; WEBSTER, 1980).

Segundo Vieira (2000), para a aplicação da krigagem, assume-se que sejam conhecidas as realizações z(x₁), z(x₂),..., z(x_n) da variável aleatória espacial Z(x), nos locais x₁, x₂,...,x_n, (amostra); que o semivariograma da variável já tenha sido determinado; e que o interesse seja estimar um valor \hat{z} na posição x. O estimador $\hat{Z}(x)$ de Z(x) é dado por:

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad 4$$

em que n é o número de vizinhos, $Z(x_i)$, envolvidos na estimativa, e λ_i são os pesos associados a cada valor medido. Para atender às condições de interpolador ótimo (krigagem), requer-se:

$$E\{\hat{Z}(x_0) - Z(x)\} = 0$$

$$Var\{\hat{Z}(x) - Z(x)\} = E\left\{\left[\hat{Z}(x) - Z(x)\right]^2\right\} = \text{mínima}$$

Para que $\hat{Z}(x)$ seja um estimador não tendencioso de $Z(x)$, a soma dos pesos das amostras tem que se igualar a um.

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

Para obter a variância mínima, introduz-se o multiplicador de Lagrange (μ), e o sistema de krigagem resultante é deduzido segundo a equação 5:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x); \quad i=1 \text{ a } N \quad 5$$

A solução deste sistema de equações simultâneas dá os pesos de krigagem λ_i .

Foram gerados também mapas de erro-padrão da predição. De acordo com Cunha et al. (2013), o mapa de erro-padrão da krigagem é referido como o desvio-padrão da predição para qualquer ponto individual. Estes mapas foram obtidos de modo que servissem de fonte de informação acerca da confiança dos valores interpolados na área em estudo.

Uma vez obtidos os resultados da análise do solo amostrados de forma convencional e em malha amostral quadrada, foi realizada a recomendação da dose de P_2O_5 a ser aplicada para suprir a necessidade de fósforo (P), para a cultura do cafeeiro. Além disto, calculou-se a recomendação da dose de K_2O a ser aplicada para suprir a necessidade de potássio (K) para esta cultura. A recomendação da dosagem a ser aplicada de P_2O_5 e K_2O , seguiu os conceitos propostos por Guimarães et al. (1999) para adubação de produção do cafeeiro, para as duas formas de amostragem. Para tal, foi desenvolvida uma planilha eletrônica

para a realização dos cálculos necessários para a obtenção das dosagens requeridas para cada ponto amostral. Nesta planilha, foram inseridos os dados da análise de solo e os critérios estabelecidos por Guimarães et al. (1999), que é o padrão seguido no estado de Minas Gerais. De acordo com estes autores, a quantidade de fertilizantes é determinada em função da produtividade média da lavoura e dos teores de nutrientes no solo. Sendo assim, considerou-se como produtividade média da área em estudo, 38 sacas por hectare.

Para a análise geoestatística e para a confecção dos mapas, foi utilizado sistema computacional R Development Core Team (2011), por meio da biblioteca geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001). Os mapas foram gerados na coordenada Universal Transversa de Mercator (UTM), na zona 23K, na qual está inserida a região de Três Pontas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises descritivas da disponibilidade do fósforo e do potássio, bem como da recomendação da dose de adubação de P_2O_5 e de K_2O , obtidos pela amostragem em malha quadrada e por amostragem convencional, podem ser observadas na Tabela 1. Ressalta-se que são observados valores em kg de P_2O_5 e o K_2O referentes à adubação em malha quadrada, em função da área de cada ponto amostral (0,34ha) e também por hectare. Quando se trata da amostragem convencional apresentaram-se os valores referentes à dosagem de cada lado que é referente à área de 11ha e à dosagem aplicada a cada lado, por hectare.

Pode-se perceber que os valores médios, encontrados pela amostragem em malha quadrada e os valores obtidos pela amostragem convencional, apresentam diferenças. Ao se observar a dosagem de P_2O_5 , quando recomendado baseado na amostragem convencional, tem-se que a dose em kg/ha do Lado B equivale à maior dose da amostragem em malha quadrada. Já considerando-se a dosagem de K_2O , observou-se que o Lado B (amostragem convencional) apresentou uma dose igual ao valor mínimo da dosagem deste produto, quando amostrado em malha quadrada.

Ao se analisarem, também, os valores mínimos e máximos dos atributos do solo e da dosagem dos fertilizantes, quando baseados em amostragem em malha quadrada (Tabela 1), percebe-se que existe variação nos dados. Contudo, somente o conhecimento desta variação não é suficiente para identificar os locais onde se encontram os altos teores, e os locais onde se encontram os teores mais baixos de um determinado atributo do solo.

TABELA 1 - Estatística descritiva do teor de fósforo no solo (P), da dose recomendada de P_2O_5 , do teor de Potássio no solo (K) e da dose recomendada de K_2O , para amostragem em malha quadrada e para amostragem convencional.

Amostragem em Malha Quadrada						
	P (mg/dm ³)	P_2O_5 (kg/pt)	P_2O_5 (kg/ha)	K (mg/dm ³)	K_2O (kg/pt)	K_2O (kg/ha)
Mínimo	1,71	8,25	24	42,12	51,56	150
Máximo	107,11	25,44	74	199,68	103,13	350
Média	9,33	17,62	51,27	103,37	72,91	212,11
DP	14,92	7,36	21,4	31,90	15,61	45,42
CV	159,83	41,74	41,74	30,86	21,42	21,42
Amostragem Convencional						
	P (mg/dm ³)	P_2O_5 (kg/pt)	P_2O_5 (kg/ha)	K (mg/dm ³)	K_2O (kg/pt)	K_2O (kg/ha)
Lado A	5,5	704	64	125	2475	225
Lado B	3,2	814	74	112	1650	150
Média	4,35	759	69	118,5	2062,5	187,5

Nesse caso, torna-se necessário utilizar a Geoestatística, para que se possa identificar a estrutura de variabilidade espacial dos dados, bem como para realizar a confecção de mapas, a fim de possibilitar o gerenciamento mais preciso das intervenções necessárias.

Baseando-se na metodologia de análise geoestatística, foi possível quantificar a magnitude e a estrutura de dependência espacial das variáveis teor de fósforo no solo (P) (mg/dm³), da dose recomendada de P_2O_5 (kg/ha) do teor de Potássio no solo (K) (mg/dm³), e da dose recomendada de K_2O (kg/ha) (Tabela 2 e Figura 3). As dosagens de P_2O_5 e de K_2O foram tomadas em kg/ha, por ser a unidade utilizada para a recomendação de adubação, segundo Guimarães et al. (1999).

O efeito pepita (C_0) é um importante parâmetro do semivariograma, e indica variabilidade não explicada, considerando-se a distância de amostragem utilizada. Como é impossível quantificar a contribuição individual desses erros, o efeito pepita pode ser expresso como porcentagem do patamar, facilitando assim, a comparação do grau de dependência espacial (GD) das variáveis em estudo (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985) (Tabela 2). Pela classificação Cambardella et al. (1994), as variáveis P_2O_5 , K e K_2O apresentaram GD forte, sendo que o P apresentou GD moderado.

Os valores dos alcances (a) relativos aos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também

um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985) ou, também, dos atributos relacionados às plantas (FERRAZ et al., 2012b). Percebeu-se, neste trabalho, que os alcances encontrados não superaram 89 m.

Silva et al. (2008), estudando dois anos agrícolas de uma lavoura cafeeira (2002/2003 e 2003/2004), encontraram que a variável P apresentou efeito pepita de 0,09 e um alcance de 86,05m na primeira safra e 0,52 e 210,04 m, respectivamente, na segunda safra. Para o K, os valores da primeira safra foram 579 e 142,08 m, e na segunda safra “C₀” igual a 973 e “a” igual a 188,02m. Ferraz et al. (2012c), ao estudarem por três anos (2007, 2008 e 2009) uma lavoura cafeeira encontraram que a variável P apresentou efeito pepita igual a 0, em todos os três anos, e o alcance de dependência espacial igual a 133,31m (2007), 89,73m (2008) e 156,76m (2009). Ao estudarem o K, os autores encontraram efeito pepita 0, para os anos de 2007 e 2008 e 0,0018 em 2009, e alcance de dependência espacial igual a 165,25m (2007), 437,67m (2008) e 83,70m (2009). As diferenças entre este trabalho e os trabalhos dos autores citados podem se dar em função da malha amostral, da área em estudo, da idade do cafeeiro, das condições climáticas dos anos em estudo, dentre outros fatores.

Após o ajuste do semivariograma (Tabela 2 e Figura 3) para cada variável, foram estimados valores das variáveis de solo estudadas e da dose necessária de adubo, por meio da krigagem ordinária.

TABELA 2 - Parâmetros estimados para o semivariograma experimental das variáveis teor de fósforo no solo (P) (mg/dm^3), da dose recomendada de P_2O_5 (kg/ha), do teor de Potássio no solo (K) (mg/dm^3) e da dose recomendada de K_2O (kg/ha), para amostragem em malha quadrada.

Variável	C_0	$C_0 + C_1$	C_1	a	GD
P	45,77	132,80	178,57	56,74	25,63 Moderado
P_2O_5	42,37	420,76	463,12	88,21	9,15 Forte
K	135,65	931,15	1066,80	80,67	12,72 Forte
K_2O	0	2043,80	2043,80	83,17	0,00 Forte

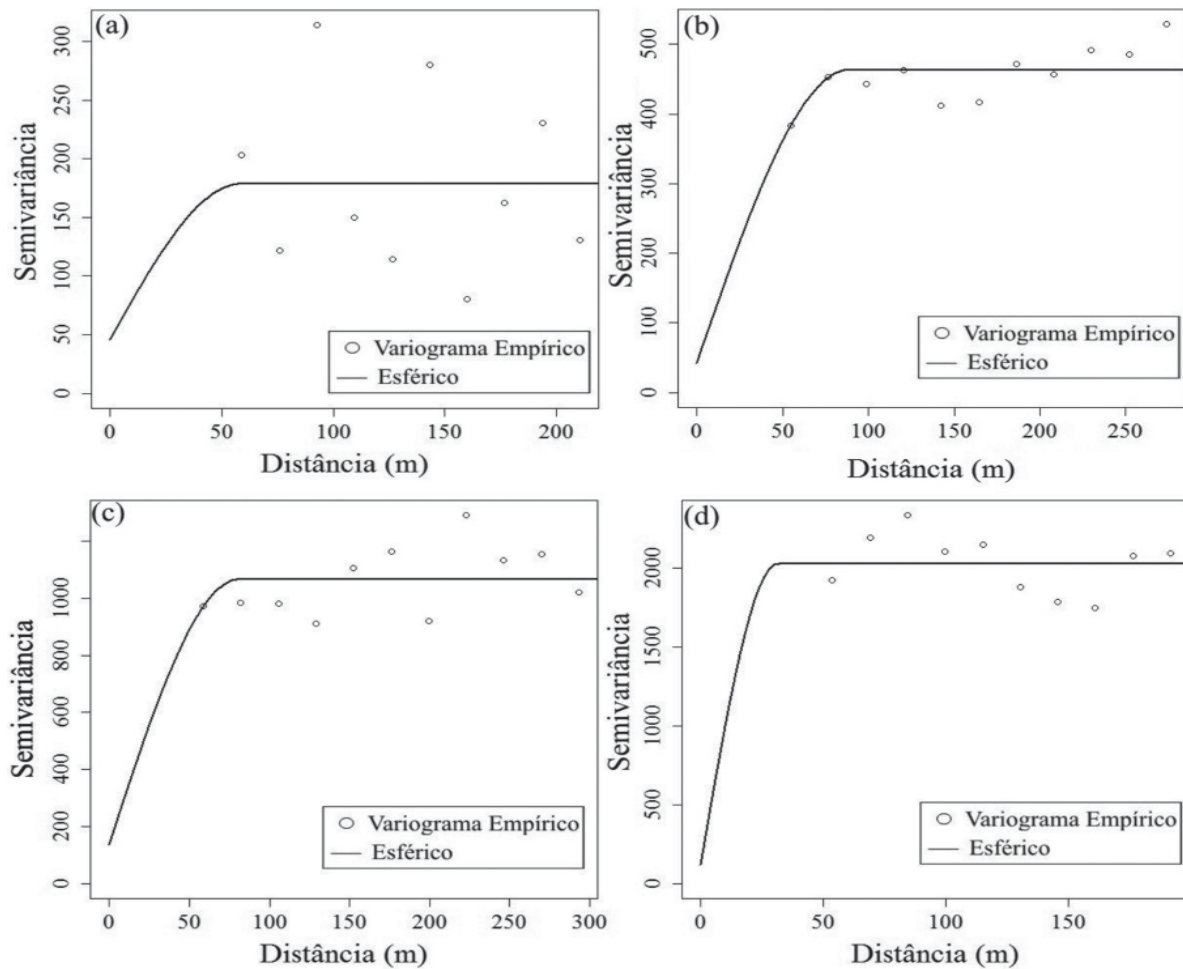


FIGURA 3 - Semivariograma da disponibilidade do Fósforo (P) (mg/dm^3) (a), Recomendação de Aplicação de Fósforo (Kg/ha) (b), disponibilidade do Potássio (K) (mg/dm^3) (c) e Recomendação de Aplicação de Potássio (Kg/ha) (d).

Desta maneira, foi possível construir mapas de distribuição espacial (isolinhas) para todas elas (Figura 4), que permitiram visualizar a variabilidade espacial do teor de P e K do solo da área, bem como a variabilidade espacial da dosagem de P_2O_5 e K_2O (em kg/ha), para suprir as necessidades destes nutrientes no solo.

Observa-se nos mapas de teor de atributos químicos P (Figura 4a) e K (Figura 4c) que as cores mais avermelhadas representam os baixos teores, enquanto que as cores mais esbranquiçadas representam os teores mais elevados. Nos mapas de recomendação de aplicação de P_2O_5 (Figura 4b) e de K_2O (Figura 4d), as cores escuras representam as maiores doses, enquanto que as cores esbranquiçadas as menores dosagens.

Pela observação da Figura 4a, pode-se perceber que grande parte da área estava com cores avermelhadas, e em um ponto da área pode-se observar coloração mais amarelada para esbranquiçada. Isto se reflete no mapa de recomendação de aplicação de P_2O_5 , onde

se percebeu que, na maior parte da área, há a necessidade de se aplicar doses maiores (cores amareladas, alaranjadas e avermelhadas).

Pela análise da Figura 4c, percebe-se que grande parte da área apresenta valores intermediários (alaranjados), para valores superiores (esbranquiçados). Analisando-se as Figuras 4c e 4d, percebe-se uma relação direta onde pontos avermelhados na Figura 4c estão avermelhados na Figura 4d.

Mapas como os da Figura 4c e 4d têm uma grande importância para guiar a aplicação diferenciada de fertilizantes, indicando a quantidade a ser aplicada em cada localidade, corroborando para uma aplicação mais eficaz. Em cafeicultura, a adubação diferenciada, ou as taxas variáveis, podem ser realizadas por meio da adubação manual, conforme citada no trabalho de Ferraz et al. (2011) ou mesmo mecanizada, conforme descrita por Molin et al. (2010). Ressalta-se que estes mapas podem ser utilizados em qualquer uma destas formas de adubação, à taxa variada.

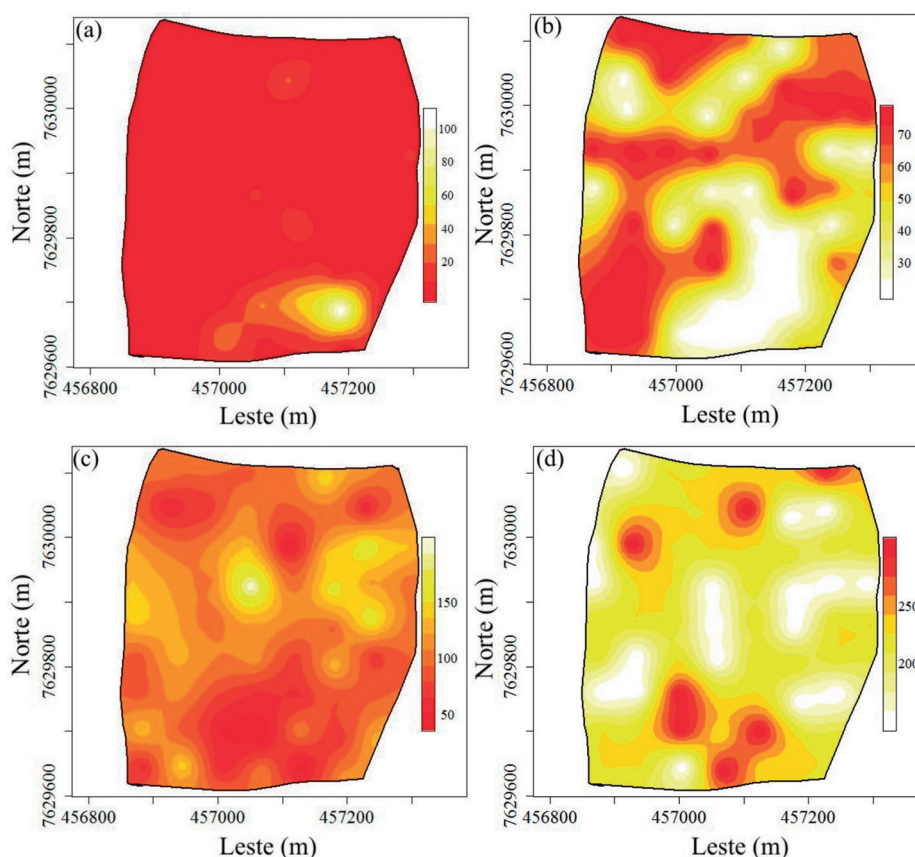


FIGURA 4 - Distribuição espacial da disponibilidade do Fósforo (P) (mg/dm^3) (a), Recomendação de Aplicação de Fósforo (kg/ha) (b), disponibilidade do Potássio (K) (mg/dm^3) (c) e Recomendação de Aplicação de Potássio (kg/ha) (d).

Pela análise da Figura 5, é possível observar os mapas de erro-padrão da predição, medem a confiança dos valores interpolados. Pode-se perceber que os maiores erros se encontram nas bordaduras da área e que nos locais mais próximos aos pontos amostrais, observam-se erros-padrão menores. Observam-se nos mapas da Figura 5, que as estimativas foram bem realizadas, pois os erros foram relativamente baixos com relação às variações apresentadas pelos atributos em estudo, já descritos na Tabela 1.

Ao se realizar um comparativo da dosagem recomendada para o P_2O_5 , para os dois sistemas de amostragem de solo (convencional e em malha quadrada), pode-se perceber que a quantidade a ser aplicada deste elemento nos 22 ha, quando se realizou a recomendação baseada na amostragem convencional, seria da ordem de 1518 kg. Já, baseando-se nos resultados da análise de solo, vindos da amostragem em malha quadrada, para cafeicultura de precisão, a recomendação seria de 1128 kg para a área em estudo, o que representou 25,7% de redução, em relação à amostragem convencional.

Para o K_2O , ao se observarem os resultados da análise de solo, baseados na amostragem convencional, a recomendação seria aplicar 4125 kg na área toda (22 ha), enquanto que a recomendação baseada na amostragem em malha quadrada, recomendaria a aplicação 4666 Kg de K_2O , nos 22 ha em estudo. Neste caso, a amostragem em malha quadrada, para cafeicultura de precisão, recomendaria uma dosagem de K_2O 11,6% maior que a amostragem tradicional.

Desta maneira, podem-se observar as diferenças nas recomendações de aplicação de fertilizantes, proporcionadas pela , nem sempre há a redução da quantidade de um determinado produto (fertilizantes, corretivos, defensivos, etc) a ser aplicado em uma área quando se utilizam os princípios da cafeicultura de precisão, porém sua maior vantagem é identificar os locais e aplicar tais produtos dentro da necessidade específica de cada região, fazendo com que assim a utilização destes seja mais eficiente e racional, tornando sua utilização vantajosa.

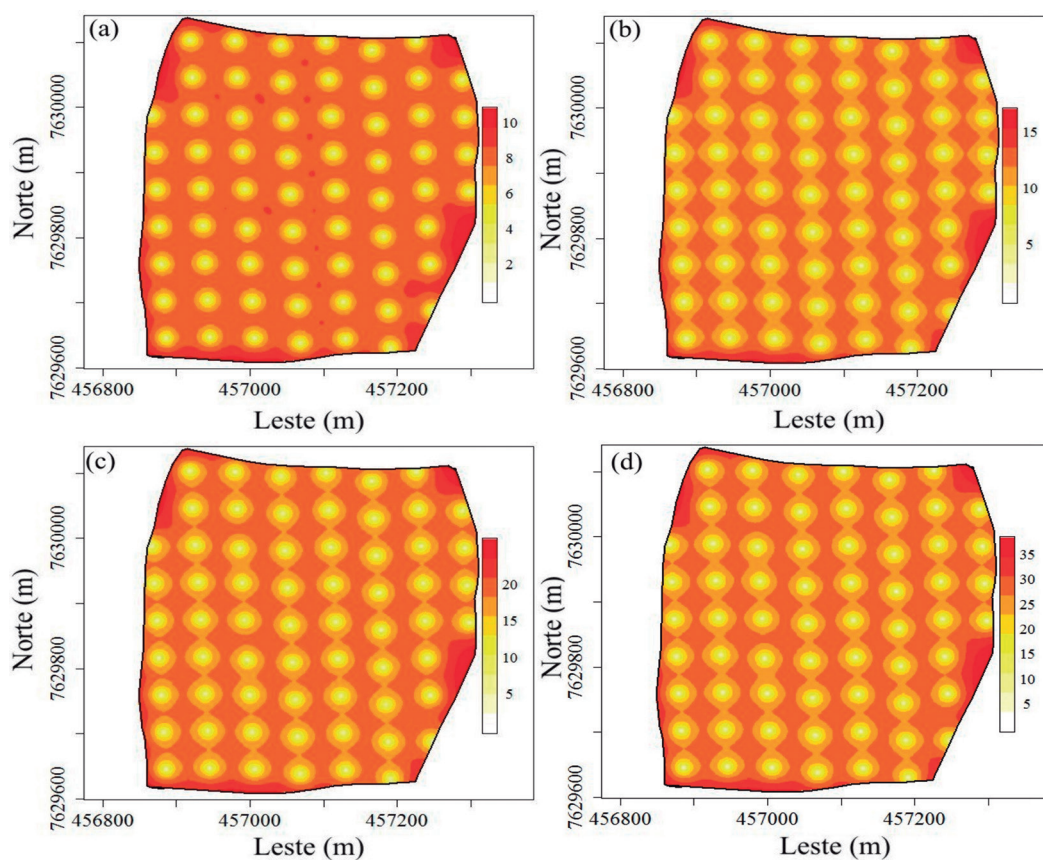


FIGURA 5 - Mapa de erros de krigagem da disponibilidade do Fósforo (P) (mg/dm³) (a), Recomendação de Aplicação de Fósforo (kg/ha) (b), disponibilidade do Potássio (K) (mg/dm³) (c) e Recomendação de Aplicação de Potássio (kg/ha) (d).

4 CONCLUSÕES

Foi possível caracterizar a magnitude e a estrutura de dependência espacial do teor de fósforo e potássio, bem como da dose a ser aplicada de P₂O₅ e K₂O, na lavoura cafeeira por meio de ajuste de semivariograma.

A distribuição espacial do teor de P e K no solo e da dose a ser aplicada de P₂O₅ e K₂O, pode ser analisada e visualizada por meio da análise dos mapas de isocores, obtidos por krigagem. Os mapas de erro-padrão demonstraram que a estimativa por krigagem ordinária apresentou maiores erros próximos do limite da área e os menores erros próximos aos pontos amostrais.

Foi possível identificar as diferenças existentes, entre a dosagem recomendada para aplicação de P₂O₅ e K₂O, obtidos pela amostragem convencional e pela amostragem em malha quadrada, para cafeicultura de precisão. Observou-se que, para o de P₂O₅, a amostragem em malha recomendou uma dose 25,7% menor que a amostragem convencional, e para K₂O, a amostragem em malha recomendou uma dose 11,6% maior que a amostragem convencional.

5 REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 10, n. 12, p. 1-14, Dec. 2009.
- AMADO, T. J. C. et al. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 831-843, ago. 2009.
- BACHMAIER, M.; BACKERS, M. Variogram or semivariogram?: understanding the variances in a variogram. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 9, p. 173-175, Feb. 2008.
- BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 645-653, out./dez. 2008.
- BERNARDI, A. C. de C. et al. Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. In: MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (Ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 153-164.
- BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II., block kriging. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 31, n. 2, p. 333-341, 1980.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 526 p.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agrônômicas da cultura do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 265-275, jul./set. 2013.
- CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, nov./dez. 2004.
- CUNHA, A. de M. et al. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 9, p. 1179-1191, set. 2013.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 59-67, jan./abr. 2012a.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, Jan. 2012b.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012c.
- FERRAZ, G. A. S. et al. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 906-915, set./out. 2011.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 169-177, mar./abr. 2005.

- GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 289-302.
- KORSAETH, A.; RILEY, H. Estimation of economic and environmental potentials of variable rate versus uniform N fertilizer application to spring barley on morainic soils in se norway. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 7, n. 4, p. 265-279, 2006.
- MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de Eucalyptus grandis. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p. 25-37, dez. 2005.
- MOLIN, J. P. et al. Teste procedure for variable rate fertilizer on coffee. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.
- OLIVEIRA, R. B. et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, mar. 2008.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 mar. 2011.
- RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.
- SILVA, A. F. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes manejos. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 173-182, maio/ago. 2010.
- SILVA, F. M. et al. Efeitos da colheita manual na bienalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-632, maio/jun. 2010.
- SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.
- SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.
- WEIRICH NETO, P. H.; SVERZUT, C. B.; SCHIMADEIRO, A. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 338-343, 2006.
- YUAN, J. et al. Gaussian process based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 33-41, Jan. 2010.