

## PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO<sup>1</sup>

MÁRCIO JOSÉ DIAS<sup>2</sup>, SUELI MARTINS FREITAS ALVES<sup>3\*</sup>, ELTON FIALHO DOS REIS<sup>3</sup>,  
DANILO GOMES DE OLIVEIRA<sup>4</sup>

**RESUMO** - Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial utilizando o método de krigagem indicativa na elaboração de mapas de probabilidade da ocorrência de atributos químicos do solo e produtividade. Os dados foram coletados em uma área de solo cultivados com soja no sistema de plantio direto com uma malha regular de amostragem de 60 x 60 m, totalizando 124 pontos. Em cada um destes foram coletadas amostras deformadas do solo para a determinação dos atributos químicos (pH, Potássio, Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis, Fósforo disponível, Zinco, acidez potencial, matéria orgânica do solo, capacidade de troca catiônica e saturação por bases). Para a determinação da produtividade foram coletadas todas as plantas dentro de 1 m<sup>2</sup> do ponto amostral. Os dados foram categorizados em códigos binários em função dos valores apresentados na recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes. Posteriormente, foi utilizada a análise geoestatística. Os atributos potássio, fósforo, magnésio e saturação por bases apresentaram dependência espacial e foram submetidos à krigagem, como a técnica de interpolação. Foram elaborados mapas de probabilidade de ocorrência dos atributos avaliados que apresentaram dependência espacial. Os mapas probabilísticos mostraram que a região central da área avaliada apresentou maior probabilidade de necessidade de correção para os teores dos atributos potássio, fósforo, magnésio e saturação por bases. A partir da análise dos mapas foi possível detectar áreas com deficiência de nutrientes e realizar correções e utilização de técnicas de manejo de forma localizada, minimizando o custo operacional e econômico dessa cultura.

**Palavras-chave:** Soja. Geoestatística. Mapas de Probabilidade. Krigagem Indicativa.

## OCCURRENCE PROBABILITY OF CHEMICAL ATTRIBUTES ON LATOSOL UNDER PLANTING DIRETO

**ABSTRACT** - This study aimed to evaluate the spatial variability using the indicative kriging method in preparing probability maps of the occurrence of soil chemical properties and productivity. Data were collected in a ground area planted with soybeans in a no-till system, with a regular grid sampling of 60 x 60 m, totaling 124 points. At each point were deformed soil samples collected to determine the chemical attributes (pH, Potassium, Calcium, Magnesium and Aluminum exchangeable, available phosphorus, zinc, potential acidity, soil organic matter, cation exchange capacity and base saturation). To determine productivity were collected all the plants within 1 m<sup>2</sup> of the sample point. Data were categorized into binary codes on the amounts presented in the recommendation for the use of lime and fertilizer. Later it used the geostatistical analysis and attributes potassium, phosphorus, magnesium and base saturation that presented spatial dependence underwent kriging as interpolation technique. Occurrence probability maps were drawn of the evaluated attributes presented spatial dependence. The probabilistic maps showed that the central area evaluated was more likely to need correction to the levels of potassium attributes, phosphorus, magnesium and base saturation. From the analysis of the maps, you can detect nutrient deficient areas and making corrections and use of localized management techniques, minimizing operating costs and economic that culture.

**Keywords:** Soy. Geostatistics. Probability maps. Indicative kriging.

\*Autor para correspondência

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 30/05/2014; aceito em 13/08/2015.

Parte da Dissertação do primeiro autor para obtenção do título de Mestre pela Universidade Estadual de Goiás (UEG), Anápolis (GO).

<sup>2</sup>Engenheiro de Controle e Automação, Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Goiás, *Campus* UnUCET, Br 153 nº 3.105-Fazenda Barreiro do Meio – Caixa Postal, 459, CEP, 75132-903, Anápolis (GO); [marciojosedias78@gmail.com](mailto:marciojosedias78@gmail.com).

<sup>3</sup> Prof. Dr. da Universidade Estadual de Goiás, *Campus* UnUCET, Br 153 nº 3.105-Fazenda Barreiro do Meio – Caixa Postal, 459, CEP, 75132-903, Anápolis (GO); [suelifreitas.ueg@gmail.com](mailto:suelifreitas.ueg@gmail.com), [fialhoreis@ueg.br](mailto:fialhoreis@ueg.br).

<sup>4</sup>Engenheiro Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Goiás, *Campus* UnUCET, Br 153 nº 3.105-Fazenda Barreiro do Me – Caixa Postal, 459, CEP, 75132-903, Anápolis (GO); [daniлогomes.engenharia@gmail.com](mailto:daniлогomes.engenharia@gmail.com).

## INTRODUÇÃO

O uso do solo, com o passar do tempo, leva ao aumento de sua heterogeneidade por meio do manejo do preparo do solo, das rotações de cultura e da aplicação de fertilizantes de forma localizada, apontam os estudos de Cavalcante et al. (2007). O Sistema de Plantio Direto (SPD) também se apresenta como responsável pela heterogeneidade do solo, principalmente por minimizar o revolvimento de suas camadas, dificultando a absorção de corretivos e fertilizantes e prejudicando o desenvolvimento das plantas (BEUTLER et al., 2001; SPERA et al., 2004; STRECK et al., 2004). Esse sistema de plantio teve início em solos de Cerrado por volta da década de 80. A SPD vem aumentando significativamente e também contribuindo para a conservação do solo, uma vez que o não revolvimento deste e a manutenção da palhada vão evitar erosão, lixiviação, proporcionar maior infiltração de água e conservar solo úmido, bem como melhorar a operacionalidade e produtividade agrícola (STONE; SILVEIRA, 2001; CUNHA et al., 2009).

O solo, por mais uniforme que seja, apresenta variações e mesmo em áreas consideradas homogêneas pode existir variação espacial de determinados atributos químicos a curtas distâncias, em grau suficiente para interferir na produtividade das culturas (AMARO FILHO et al., 2007; SILVA; ZIMBACK; LANDIM, 2013). Para inferir sobre a variabilidade do solo tem-se utilizado cada vez mais da geoestatística. Esta ferramenta permite que além de caracterizar uma determinada área seja possível a utilização de técnicas de manejo de forma localizada, minimizando o custo operacional e econômico de uma cultura (SILVA; LIMA, ZUCOLOTO, 2011).

Silva, Lima, Zucoloto (2011) e Yamamoto e Landim (2013) fizeram uso da geoestatística para estratificar a variabilidade espacial utilizando a técnica de krigagem, sendo as formas mais usuais a krigagem simples, a ordinária e a indicativa. A krigagem ordinária é um método de interpolação de dados que usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa por meio de um semivariograma ajustado, para estimar valores em qualquer posição dentro do espaço analisado. Na krigagem indicativa os dados são transformados em variáveis categóricas, realizando uma transformação matemática não linear, denominado de codificação por indicação. Seu objetivo não é apenas estimar um determinado valor, mas definir áreas com maior ou menor PROBABILIDADE de ocorrência de um evento (MOTOMIYA; CORÁ; PEREIRA, 2006; SILVA; LIMA, ZUCOLOTO, 2011; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Landim e Sturaro (2002) e Yamamoto e Landim (2013) descreveram que o procedimento estabelecido para indicar os pontos de cortes na krigagem indicativa podem ser realizados em função dos per-

centis, decis e/ou quartis de uma função acumulada ou até mesmo da existência ou ausência da variável estudada. Em se tratando da existência ou não do atributo estudado o procedimento é a transformação e codificação arbitrária, em zero (0) e um (1), dos dados originais em valores que estão acima ou abaixo de um determinado nível de corte. A aplicação dessa técnica resulta em um novo conjunto de dados, os quais serão utilizados para estimar valores de distribuição em um determinado local, cuja função pode ser ajustada pelo semivariograma (LANDIM; STURARO, 2002).

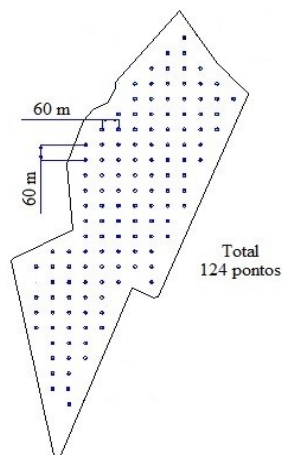
Este trabalho teve como objetivo o estudo e a avaliação da incerteza probabilística da variabilidade espacial dos atributos químicos de um Latossolo e a produtividade em área de produção de soja cultivada sob plantio direto, utilizando a técnica de krigagem indicativa e a identificação das áreas com maior deficiência nutricional.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho são oriundos de uma área de produção de soja no ano agrícola de 2012/2013, cultivada sob plantio direto. A área está situada no Município de Anápolis (GO), Brasil, 16°22'44"S e 48°42'23"W e altitude de 1040 m. Ela possui 37,85 hectares e é classificada como Latossolo predominante com textura Franco-Argilo-Arenosa, conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013).

As amostras foram coletadas no centro da malha regular de amostragem 60 x 60 m, totalizando 124 pontos, conforme apresentado no croqui (Figura 1). Cada ponto foi georreferenciado utilizando aparelho de Sistema de Posicionamento Global-GPS, cujo modelo "Omnistar SST" (Fugro®) possui o sistema de correção diferencial em tempo real via satélite geostacionário, com serviço fornecido pelo próprio fabricante do GPS, e um computador portátil Pocket PC Ipaq 3850 munido de um programa de navegação "Field Rover II".

Para a determinação dos atributos químicos do solo foram coletadas cinco amostras deformadas de solo na camada de 0,0 a 0,20 m em um raio de um metro em torno de cada ponto da grade amostral. As análises de pH em CaCl<sub>2</sub>, Potássio (K<sup>+</sup>), Cálcio (Ca<sup>2+</sup>), Magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e Alumínio trocáveis (Al<sup>3+</sup>), Fósforo disponível (P), Zinco (Zn), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica do solo (MOS), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V %) foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solos Certificado, com aproximadamente 300 g de amostra de solo de cada ponto amostral para análise química segundo metodologia proposta no manual de métodos de análise de solos (DONAGEMA, G. K. et al., 2011).



**Figura 1.** Croqui do gride amostral da área utilizada para coleta dos atributos do solo e produtividade da cultura da soja.

Para determinar a produtividade, as plantas foram colhidas manualmente em 1m<sup>2</sup> ao redor do ponto amostral, transportados ao laboratório, as quais após trilhadas tiveram a massa de grãos pesadas e extrapoladas para kg ha<sup>-1</sup>, sendo considerada a umidade de 13 % de base úmida (bu) para todos os pontos amostrados. As amostras foram pesadas utilizando balança digital com precisão de 0,01 g.

Os atributos químicos e produtividade foram analisados inicialmente por meio da análise descritiva e exploratória. Em seguida, para cada atributo químico foi realizada uma transformação não linear denominada codificação por indicação.

A definição dos pontos de cortes foi realizada em função dos valores de referências para recomendação do uso de corretivos e fertilizantes Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999) conforme apresentado

na (Tabela 1), e a interpretação conforme Alvarez et al., (1999). Logo, os dados foram transformados em códigos binários (1 ou 0), ou seja, os dados originais foram codificados como zero (0) quando os valores estavam acima da referência considerada no nível de corte, e em (1) quando estavam abaixo da referência considerada no nível de corte. A codificação por indicação foi realizada conforme metodologia proposta por Felgueiras; Druck e Monteiro (2002), conforme expresso na (Equação 1).

$$ij(V_c) \begin{cases} 1 & \text{se } V_j \leq V_c \\ 0 & \text{se } V_j > V_c \end{cases} \quad (1)$$

em que:  
V<sub>c</sub> = nível de corte;  
V<sub>j</sub> = é o valor observado.

**Tabela 1.** Valores de referência para os pontos de cortes na codificação por indicação.

Atributos	Unidade	Codificação em relação ao ponto de corte	
		0	1
Matéria orgânica do solo – MOS	g dm <sup>-3</sup>	se MOS > 40,1	se MOS ≤ 40,1
Cálcio trocável – (Ca <sup>2+</sup> )	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	se Ca <sup>2+</sup> > 2,41	se Ca <sup>2+</sup> ≤ 2,41
Magnésio trocável – (Mg <sup>2+</sup> )	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	se Mg <sup>2+</sup> > 0,91	se Mg <sup>2+</sup> ≤ 0,91
Acidez Potencial – (H + Al)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	se (H + Al) > 5,01	se (H + Al) ≤ 5,01
CTC – pH 7 (T)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	se CTC > 8,61	se CTC ≤ 8,61
Potássio trocável – (K <sup>+</sup> )	mg dm <sup>-3</sup>	se K <sup>+</sup> > 71,0	se K <sup>+</sup> ≤ 71,0
Alumínio trocável – (Al <sup>3+</sup> )	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	se Al <sup>3+</sup> > 0,0	se Al <sup>3+</sup> ≤ 0,0
Fósforo disponível – P	mg dm <sup>-3</sup>	se P > 20,1	se P ≤ 20,1
Saturação por bases – V %	%	se V % > 60,1	se V % ≤ 60,1
pH - CaCl2	- -	se pH > 5,5	se pH ≤ 5,5
Zinco – Zn	mg dm <sup>-3</sup>	se Zn > 1,6	se Zn ≤ 1,6
Produtividade	kg ha <sup>-1</sup>	se Prod. > 3000	se Prod. ≤ 3000

CTC – capacidade de troca catiônica; pH - CaCl2 – Acidez do solo (Classificação agrônômica).  
Fonte: Adaptação de Alvarez et al., (1999).

Após a codificação dos dados foi realizada a análise geoestatística para cada atributo por meio do

ajuste do semivariograma, conforme Isaaks e Srivastava (1989), Equação 2:

$$y_1(h, V_c) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [i(x+h, V_c) - i(x, V_c)]^2 \quad (2)$$

em que:

$h$  = passo (*lag*) básico;

$V_c$  = nível de corte (*cutoff*);

$N$  = número de pares.

Para a escolha do melhor modelo foi adotado como critério a menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para a análise da dependência espacial foi calculado o avaliador de dependência espacial (ADE) definido conforme Equação 3:

$$ADE = \frac{C}{C0 + C} 100 \quad (3)$$

em que:

$C$ : representa a variância estrutural;

$C0+C$ : representa o patamar.

Para a análise desse índice foi utilizado a interpretação proposta por Montanari et al. (2010), em que a dependência espacial é considerada fraca para valores até 25%, moderada entre 25 % e 75 % e forte acima de 75 %.

Para as variáveis que não apresentaram dependência espacial foram realizadas as análises exploratórias dos dados, calculando medidas de tendência central e dispersão (SILVA; LIMA; ZUCOLOTO, 2011). Segundo Cambardella et al., (1994) e Vieira (2000), o Efeito Pepita Puro (EPP) pode refle-

tir um erro analítico, indicando uma variabilidade não explicada de um ponto amostral para outro.

As variáveis que apresentaram dependência espacial foram submetidas a krigagem como técnica de interpolação, nesse caso a krigagem indicativa, com os dados categorizados, com o objetivo de definir áreas com maior ou menor probabilidade de ocorrência dos atributos químicos.

Os mapas probabilísticos foram elaborados de acordo com a metodologia descrita em Landim e Sturaro (2002), nos quais as escalas de probabilidades da ocorrência estão definidas entres os intervalos (0 a 1), em que 0 (zero) significa que a probabilidade de ocorrência acima do limite definido no ponto de corte é de 100 %.

A análise descritiva dos atributos químicos e da produtividade foi realizada utilizando o *software* R. Para a análise geoestatística foi utilizado o *software* GS+ versão 7.0, Gamma Design Software® (*Geostatistics for the Environmental Sciences*).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta o resumo descritivo das variáveis em estudo. A área pesquisada apresentou produção média de 3550 kg ha<sup>-1</sup> de soja, com a mínima de 1400 kg ha<sup>-1</sup> e máxima de 5600 kg ha<sup>-1</sup>. Essa média produtividade é maior que a média estadual e nacional, 3100 e 2950 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, conforme relatório apresentado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2013).

**Tabela 2.** Resumo descritivo para a produtividade da cultura soja e dos atributos químicos do solo em estudo.

Atributos	Unidade	Média	DP	CV %	Mín.	Máx.	* Nível de Classificação
Produtividade	kg ha <sup>-1</sup>	3550	0,7	19,7	1400	5600	-
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,34	0,66	28,07	1,00	3,90	Médio
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,710	0,19	26,20	0,30	1,20	Médio
K <sup>+</sup>	mg m <sup>-3</sup>	65,93	29,64	44,96	23,00	173,00	Médio
Al <sup>3+</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,004	0,03	734,8	0,00	0,30	Muito baixo
(H+Al)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,410	0,43	17,72	1,60	3,70	Bom
P	mg m <sup>-3</sup>	13,51	11,52	85,27	1,80	77,00	Médio
Zn	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	5,810	2,48	42,69	2,50	14,10	Alto
pH	-	5,46	0,20	3,72	4,80	6,00	Bom
MOS	g dm <sup>-3</sup>	22,64	4,89	21,61	14,00	54,00	Médio
V %	%	56,46	7,50	13,29	30,60	71,40	Fértil
CTC	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	5,63	1,02	18,12	3,90	8,40	Médio

DP - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação; Mín. - mínimo; Máx. - máximo; \* Classificação dos atributos químicos, conforme Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999), e Alvarez et al., (1999). Ca<sup>2+</sup> - cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup> - magnésio trocável; K<sup>+</sup> - potássio; Al<sup>3+</sup> - alumínio trocável; (H + Al) - acidez potencial; P - fósforo disponível; Zn - zinco; pH - (CaCl<sub>2</sub>) potencial hidrogeniônico; MOS- matéria orgânica do solo; V % - saturação por bases; CTC - capacidade de troca catiônica a pH 7.

Os teores médios de potássio e fósforo (65 mg dm<sup>-3</sup> e 13,51 mg dm<sup>-3</sup>), respectivamente, encontrados na área em estudo classificam-se em nível médio para ambos atributos (Tabela 2). Alvarez et al., (1999), em seu trabalho sobre recomendação para uso de corretivos e fertilizantes, apontam que a disponibilidade do potássio e do fósforo varia de acordo com a dinâmica das fontes desses nutrientes quando

adicionados ao solo. Ao lado do Nitrogênio, o potássio é um dos elementos mais extraídos pelas plantas e sua função é contribuir em várias atividades bioquímicas, sendo um ativador de grande número de enzimas (MALAVOLTA, 2006). Kamimura et al., (2013) discutem que o conhecimento da variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo é importante para o monitoramento de sua qualidade, haja

vista que eles estão diretamente relacionados com a sustentabilidade da produção agrícola. O estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo visa aperfeiçoar as aplicações de corretivos e fertilizantes, reduzindo a degradação ambiental e melhorando o controle do sistema de produção das culturas (SOUZA; MARQUES JUNIOR; PEREIRA, 2004; SILVA et al., 2007; OLIVEIRA; ROCHA, 2011).

Considerados como macronutrientes secundários, os teores de cálcio e magnésio foram encontrados na proporção média de 2,34 e 0,71 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente, os quais também estão classificados como nível médio (ALVAREZ et al., 1999). O cálcio como constituinte do solo promove a redução da acidez do solo e melhora a resistência à toxidez provocada pelo excesso do alumínio. Já o magnésio é um constituinte da molécula de clorofila, cuja deficiência aparece com um amarelecimento entre as nervuras das folhas mais velhas (MALAVOLTA, 2006).

A matéria orgânica do solo em estudo está classificada como nível médio. Essa deficiência pode prejudicar diversos benefícios físicos, químicos e biológicos (ALVAREZ et al., 1999). A matéria orgânica do solo, basicamente composta por resíduos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição (matéria orgânica não humificada e humificada), desempenha um papel crítico na capacidade que as plantas apresentam para absorver nutrientes (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

O solo em estudo não apresenta toxidez ao alumínio devido ao teor encontrado ser classificado como muito baixo. O teor de alumínio em alta quantidade apresenta prejuízo ao desenvolvimento normal de grandes números de plantas (MALAVOLTA, 2006).

Os valores do coeficiente de variação, segundo critérios de Warrick e Nielsen (1980), podem ser classificados como baixa variação para o pH e alta para alumínio. Com relação ao pH há uma homogeneidade na área. Contudo, dos valores encontrados de alumínio nos 124 pontos analisados apenas três pontos foram quantificados com sua presença, justificando alto coeficiente de variação, mostrando que a correção de fertilidade do solo seguiu recomendações agronômicas de calagem à taxa uniforme para toda a área.

A Tabela 3 apresenta o resultado da análise geoestatística com os modelos ajustados para os semivariogramas isotrópicos para os atributos químicos do solo em estudo e da produtividade, enquanto que a Figura 2 apresenta os semivariogramas isotrópicos dos atributos que apresentaram dependência espacial. A Figura 3 apresenta os mapas de probabilidades de ocorrências dos atributos que apresentaram dependência espacial. Entre as 12 variáveis analisadas, quatro apresentaram dependência espacial, sendo que o melhor modelo ajustado foi o gaussiano para o potássio e magnésio, exponencial para o potássio e o esférico para a saturação por bases.

O Avaliador de Dependência Espacial (ADE) encontrado variou de 50,2 a 92,3 %. De acordo com a interpretação proposta por Montanari et al. (2010), o ADE é moderado para os atributos potássio, magnésio e saturação por bases e classificado como forte para o atributo fósforo.

A ausência de dependência espacial foi identificada nos atributos pH - potencial hidrogeniônico, cálcio, alumínio, zinco, acidez potencial, matéria orgânica do solo, capacidade de troca catiônica e a variável Produtividade (Tabela 3).

**Tabela 3.** Modelos teóricos de semivariância ajustados para atributos químicos do solo e da produtividade (dados codificados).

Variáveis	Modelo	Alcance (A)	Patamar (C <sub>0</sub> +C)	Efeito Pepita (C <sub>0</sub> )	ADE (C/(C <sub>0</sub> + C))	R <sup>2</sup>	SQR	VC
pH	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
K <sup>+</sup>	Gaussiano	681,0	0,425	0,128	0,698	0,990	8,540E-04	0,785
P	Exponencial	54,0	0,150	0,012	0,923	0,668	4,70E-4	0,554
Ca <sup>2+</sup>	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
Mg <sup>2+</sup>	Gaussiano	860,2	0,190	0,086	0,548	0,806	4,588E-03	0,883
Al <sup>3+</sup>	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
Zn	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
(H+Al)	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
MOS	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
CTC	EPP*	-	-	-	-	-	-	-
V %	Esférico	767,0	0,257	0,128	0,502	0,977	4,446E-04	0,463
Produção	EPP*	-	-	-	-	-	-	-

ADE - avaliador de dependência espacial; R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; SQR - soma dos quadrados dos resíduos; VC - coeficiente de regressão da validação cruzada; EPP\* - efeito pepita puro; pH - (CaCl<sub>2</sub>) potencial hidrogeniônico; K<sup>+</sup> - potássio; P - fósforo; Ca<sup>2+</sup> - cálcio; Mg<sup>2+</sup> - magnésio trocável; Al<sup>3+</sup> - alumínio trocável; Zn - zinco; (H + Al) - acidez potencial; MOS - matéria orgânica do solo; V % - saturação por bases.

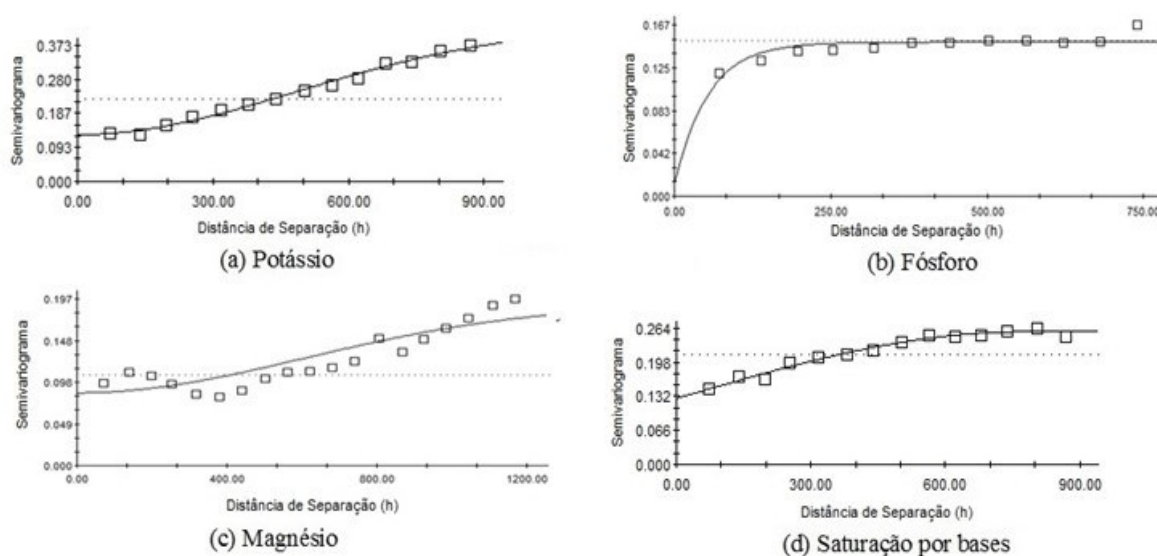


Figura 2. Semivariogramas isotrópicos dos atributos que apresentaram dependência espacial.

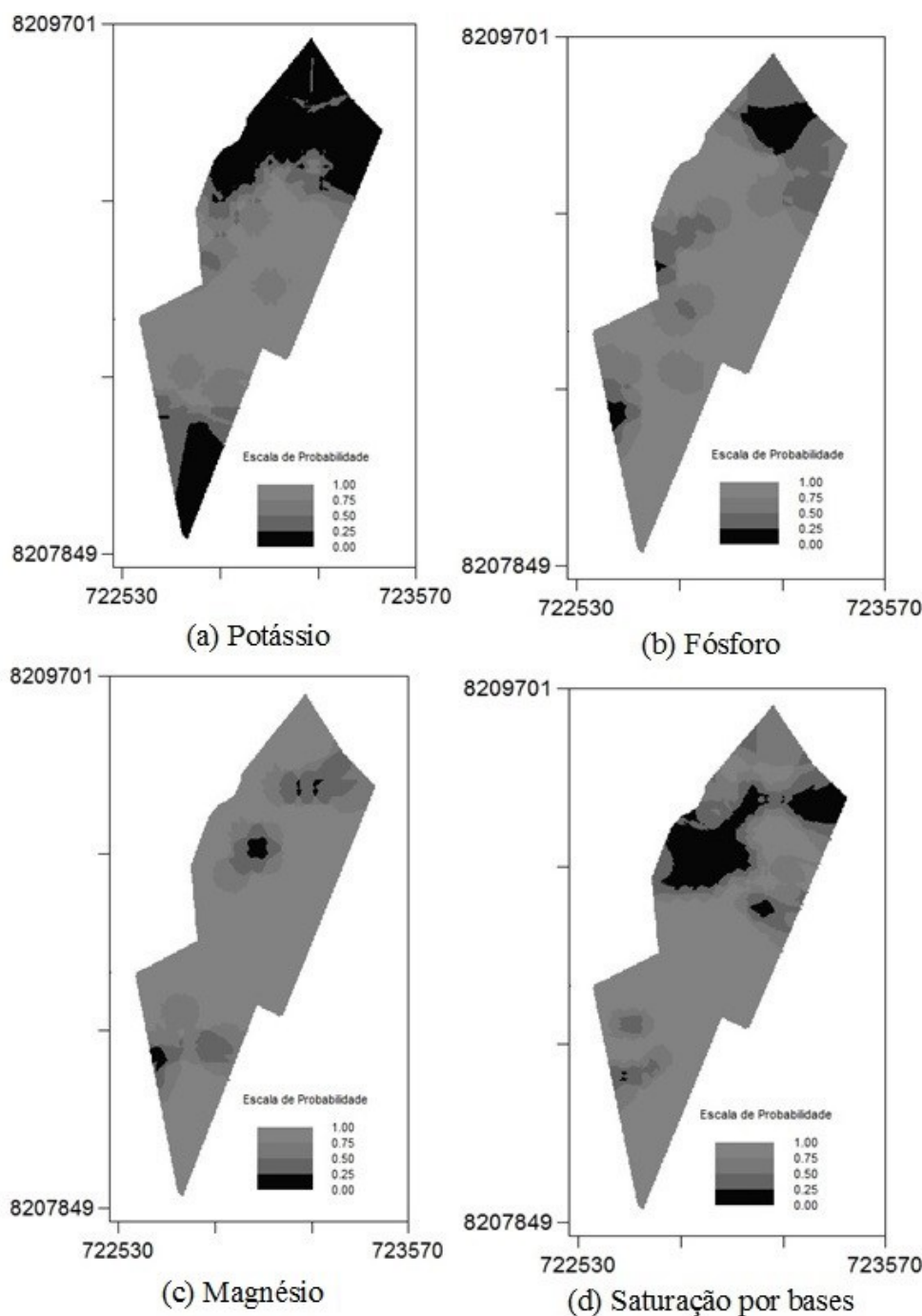
A Figura 3 (a) e (b) apresenta a distribuição da incerteza probabilística de ocorrência das variáveis potássio e fósforo, respectivamente. A ocorrência de teores de potássio apresentou maior probabilidade de encontrar teores acima do valor de referência de  $71,0 \text{ mg dm}^{-3}$  nas regiões norte e sul do mapa. A distribuição do fósforo apresenta comportamento semelhante ao potássio, com maior probabilidade de ocorrências também nas regiões norte e parte da região sul, com teores acima de  $20,1 \text{ mg dm}^{-3}$ . As probabilidades de ocorrências de fósforo e potássio podem ser explicadas porque a região norte da área apresenta solo com maior fertilidade, ratificada pela distribuição probabilística do atributo saturação por bases (Figura 3d). A região central e parte da região sul apresentam solo com maior deficiência de nutrientes. Assim, pode ser indicada a correção com adição de maiores quantidades de fertilizantes a base de fósforo e potássio nessa região. Manzione e Zimback (2011) concluíram em seu trabalho que é possível, a partir de escalas moderadas, estabelecer zonas de manejo para aplicação de fertilizantes, formulados a partir de PK, respeitando a variabilidade espacial dos elementos no solo.

O magnésio apresentou maior probabilidade de ocorrência de valores acima da referência de  $0,91 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  em parte das regiões sul, norte e central da área, conforme a ocorrência da distribuição da incerteza probabilística apresentada na Figura 3 (c), enquanto que nas regiões central e periférica a área apresentou menor probabilidade de ocorrência, ou seja, teores abaixo de  $0,91 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Sua principal forma de acréscimo ao solo é por meio da aplicação de calcário, e de forma secundária em composição com fertilizantes (MALAVOLTA, 2006). A aplicação do calcário, ou até mesmo de outros fertilizantes, pelo cálculo tradicional em função da média po-

de ser o principal fator que está influenciando essa alta variabilidade espacial. De forma geral, o teor de magnésio na área se encontra baixa. Essa deficiência pode ocasionar pouca absorção da clorofila pela planta pelo fato da diminuição da fotossíntese em função do amarelecimento de suas folhas, logo consequente redução de produtividade.

A saturação por bases (Figura 3d) apresentou maior probabilidade de concentração em parte das regiões central e norte do mapa. Nessas áreas há uma maior probabilidade de ocorrência de saturação por bases acima  $60,1 \%$ . De acordo com a probabilidade encontrada para a saturação por bases, a região norte pode ser considerada como a área de solos com melhor qualidade. A saturação por bases é considerada como excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, sendo utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos (RONQUIM, 2010; EPSTEIN; BLOOM, 2006; KIEHL, 2008).

O solo estudado, para os atributos químicos que apresentaram dependência espacial, de acordo com as recomendações do uso de corretivos e fertilizantes apresentados por Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999), apresenta boas condições ao desenvolvimento da soja. No entanto, a região central da área estudada apresenta aproximadamente 75% de probabilidade dos teores dos atributos potássio, fósforo, magnésio e saturação por bases por estarem abaixo do teor de seus valores de referência, ou seja, são áreas onde foram detectadas deficiências nutricionais e, portanto, é indicada a correção com adição de maiores quantidades de fertilizantes. Pela análise dos mapas é possível indicar ao produtor correções e utilização de técnicas de manejo de forma localizada, minimizando o custo operacional e econômico da cultura da soja.



**Figura 3.** Mapa de probabilidades de ocorrência dos atributos que apresentaram dependência espacial.

## CONCLUSÃO

A probabilidade de ocorrência dos atributos potássio, fósforo, magnésio e saturação por bases apresentaram dependência espacial e as demais efeito puro.

Os mapas probabilísticos mostraram que a região central apresentou maior probabilidade de necessidade de correção para teores dos atributos potássio, fósforo, magnésio e saturação por bases.

A partir dos estudos realizados, generalizar a aplicação dos insumos para essa área, conforme cálculo tradicional em função da média, não é o mais

indicado, haja vista que conforme análise dos mapas é possível fazer correções e utilizar técnicas de manejo de forma localizada, minimizando o custo operacional e econômico da cultura da soja.

O método de krigagem indicativa pode ser utilizado como ferramenta para mapear a probabilidade de incerteza de disponibilidade dos atributos químicos do solo e detectar áreas com deficiência de nutrientes.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pela concessão de bolsa de formação de Mestrado do primeiro autor.

À Universidade Estadual de Goiás (UEG) pela concessão de bolsa de incentivo ao pesquisador do segundo e terceiro autores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de formação de Mestrado do último autor.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. cap. 5, p-30-35.

AMARO FILHO, J. et al. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 415-422, 2007.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soils Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 1501-11, 1994.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 1329-1339, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, sétimo levantamento, abril/2013**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php>>. Acesso em abril de 2013.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009.

DONAGEMMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Componentes Inorgânicos de Plantas. In: EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Pers-**

**pectivas**. 2 ed. Londrina: Editora Planta, 2006. v.1, cap. 3, p. 41-65.

FELGUEIRAS, C. A.; DRUCK, S.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de superfície: o enfoque da geoestatística por indicação**. São José dos Campos, SP: INPE, 2002. cap. 4, p. 1-23.

GAMMA DESIGN LLC. GS+ versão 7.0 - **Geostatistics for the environmental sciences**. Michigan – USA, 2010, Conjunto de Programas, 1 CD-ROM.

KAMIMURA, K. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 877-888, 2013.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Organominerais**. 4. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 160 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560 p.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas de probabilidades de riscos**. Rio Claro: UNESP, 2002. 19 p. (Texto Didático, 06).

MALAVOLTA, E. Funções dos Macro e Micronutrientes. In: MALAVOLTA, E. (Ed.). **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. cap. 4, p. 124-402.

MANZIONE, R. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial multivariada aplicada na avaliação de fertilidade do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 227-235, 2011.

MONTANARI, R. et al. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, 2010.

MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 485-496, 2006.

OLIVEIRA, S. B.; ROCHA, M. M. Krigagem Indicadora Aplicada aos Litotipos do Depósito de NI-CI de Americano do Brasil, GO. **Revista do Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 123-134, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM, **R Foundation for Statistic Computing 2010**. Conjunto de Programas. 1 CD-ROM.



- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 359 p.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas, 2010. 26 p.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.
- SILVA, A. F. et al. **Aplicação da geoestatística em ciências agrárias**. Botucatu, SP: FEPAF, 2011. 136 p.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; ZUCOLOTO, M. Distribuição espacial das frações granulométricas em um Latossolo Vermelho utilizando krigagem indicativa, **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 195-202, 2011.
- SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e da produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, 2007.
- SILVA, A. F.; ZIMBACK, C. R.; LANDIM, P. M. B. **Aplicação da geoestatística em ciências agrárias: parte II**. Botucatu, SP: FEPAF, 2013. 145 p.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas de relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 937-944, 2004.
- SPERA, S. T. et al. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob semeadura direta nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 533-542, 2004.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.
- STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, G.R. (Ed). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 2, p. 1-54.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. cap. 13, p. 319-344.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2013. 215p.