

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM SOLO POR MEIO DE KRIGAGEM INDICATIVA.

**Leonardo Rodrigues Caetano^{1*} (IC), Sueli Martins de Freitas Alves² (PQ), Elaine de Fatima
Miranda Freitas³ (PG), Cláudio Magela Soares⁴ (PG), Ivandro José de Freitas Rocha⁵ (PG)**

leoohcaetano@gmail.com

^{1,2,3,4 e 5} Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas,
Anápolis, GO

Resumo: A geoestatística calcula a estimativa dentro de um contexto regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. Devido a essa característica tem sido grande a sua aplicação principalmente para efetuar estimativas e/ou simulações de variáveis em locais não amostrados. Este trabalho teve por objetivo, o estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, utilizando a técnica de Krigagem indicativa. Os dados foram coletados em um talhão manejado sob plantio direto, onde foram georreferenciados 120 pontos em uma malha de 60x60m. Em cada ponto foram coletadas amostras deformadas de solo nas profundidades de 0,00 a 0,20 m, para determinação dos atributos químicos do solo. Os dados originais foram submetidos à estatística descritiva a fim de se conhecer e resumir cada variável, logo após, para caracterizar a variabilidade espacial e a incerteza probabilística dos resultados foi utilizada a geoestatística, por meio da técnica de krigagem indicativa, transformando e categorizando os dados em códigos binários (1 ou 0). A probabilidade de ocorrência do atributo fósforo apresentou dependência espacial considerada forte e os demais atributos efeito pepita puro.

Palavras-chave: Solanum lycopersicum. Geoestatística. Mapas Probabilísticos.

Introdução

O tomateiro (*Solanum lycopersicum*) é uma das olerícolas de maior importância econômica, sendo que a produção mundial de tomate para processamento em 2016 foi de aproximadamente 38 milhões de toneladas, os principais países produtores são Estados Unidos, Itália e China. O Brasil encontra-se em oitavo lugar dos países produtores de tomate. Em 2016, a soma da produção brasileira de tomate industrial e de mesa foi de 3,7 milhões de toneladas, um terço dos quais foram destinados ao processamento industrial (WPTC, 2017; IBGE, 2016).

As principais regiões brasileiras produtoras de tomate industrial são Sudeste e Centro-Oeste, sendo o estado de Goiás que se destaca com maior produtividade.

Porém, vale ressaltar que o manejo da cultura ainda enfrenta vários problemas, como a diferenciação química dos solos (HOTT et al., 2014).

O uso do solo, com o passar do tempo, leva ao aumento de sua heterogeneidade por meio do manejo de preparo do solo, rotações de cultura, efeitos residuais de adubos e corretivos, forma de aplicação de insumos (BURAK et al., 2016). 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).

Ao se tratar de soluções para gerenciamento localizado de cultura surge o conceito de Agricultura de Precisão (AP). A geoestatística, aplicada às ciências agrárias, tem utilizado a técnica de Krigagem que por meio da função do “variograma ou semivariograma” (processo de estimativa por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes) permite estimar ou simular variáveis regionalizadas em locais não amostrados, identificando a variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas, no espaço e no tempo (LANDIM e STURARO, 2002).

As formas mais usuais de simular ou estimar variáveis regionalizadas são a Krigagem simples e a Krigagem ordinária. A Krigagem simples é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área. A Krigagem ordinária utiliza a média móvel de um estimador linear, com mínima variância para interpolação do atributo medido em posições não amostradas. Enquanto que, a Krigagem indicativa é uma ramificação da Krigagem ordinária onde os dados são transformados e categorizados tomando como referência pontos de corte, antes da estimativa, denominado de codificação por indicação (FELGUEIRAS et al., 2002; MOTOMIYA et al., 2006; SILVA et al., 2011).

A análise detalhada da variabilidade dos atributos do solo pode indicar tomadas de decisões, orientando a correção de fatores que afetam a produção ao longo do tempo, com base nos mapas de manejo (MILLANI et al., 2006).

Este trabalho teve como objetivo, o estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, utilizando a técnica de Krigagem indicativa e mapas probabilísticos.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido em uma lavoura de tomate para processamento industrial no Município de Corumbá de Goiás, Fazenda Baião, numa área irrigada por pivô central correspondente a 105 ha, com altitude de 963 m, latitude 15° 55' 27" S e longitude 48° 48' 32" W.

A localização geográfica dos pontos amostrais foi realizada com a utilização de um aparelho GPS (Sistema de Posicionamento Global), com o sistema de correção diferencial em tempo real via satélite. Os dados foram coletados em um talhão de 45 ha, em uma grade amostral de 60x60 m, totalizando 120 pontos amostrais, Figura 1.

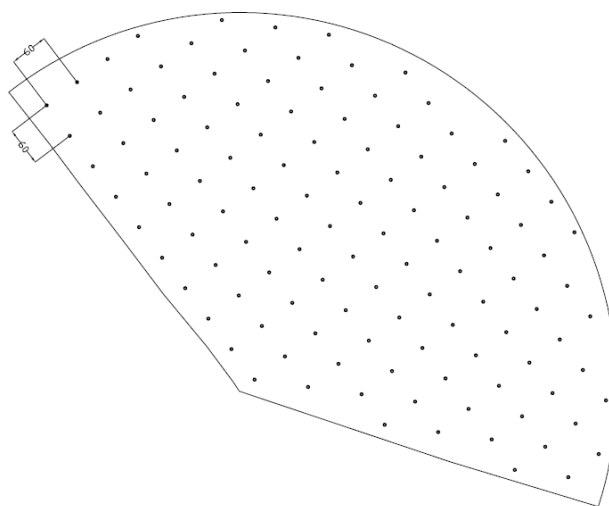


Figura 1. Malha amostral para coleta de amostras de solo.

Para a determinação dos atributos químicos do solo foram coletadas amostras de solo na camada (0,0 a 0,20 m) de profundidade, cada amostra foi composta por 5 amostras simples, coletadas em um raio de um metro, em torno de cada ponto amostral. As amostras foram embaladas, identificadas e encaminhadas para laboratório comercial de análise de solo, para determinação dos atributos químicos: pH, Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Matéria Orgânica (MO), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por Bases (V%).

Os dados dos atributos químicos do solo foram analisados inicialmente por meio da análise descritiva e exploratória. Em seguida, para cada atributo químico foi realizada uma transformação, denominada codificação por indicação. A definição dos pontos de cortes foi realizada em função dos valores de referências segundo

Silva et al. 2012 e Comissão de Fertilidade do Solo de Goiás (1988), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de referência para pontos de corte dos atributos químicos de solo para a cultura de tomate industrial.

Atributos	Unidade	Codificação em relação ao ponto de corte	
		0	1
pH	-	Se pH > 6	Se pH < 6
P	mg dm ⁻³	Se P > 20	Se P < 20
MO	g Kg ⁻¹	Se MO > 30	Se MO < 30
SB	%	Se SB > 70	Se SB < 70
CTC	cmolc dm ⁻³	Se CTC > 6,5	Se CTC < 6,5
K	cmolc dm ⁻³	Se K > 0,2	Se K < 0,2
Mg	cmolc dm ⁻³	Se Mg > 0,5	Se Mg < 0,5
Ca	cmolc dm ⁻³	Se Ca > 1,2	Se Ca < 1,2

Fonte: Adaptado Silva et al. 2012; Comissão de Fertilidades do solo de Goiás, 1988. pH – potencial hidrogeniônico; P – Fósforo; MO - Matéria Orgânica; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; SB – Saturação por bases; K – Potássio; Mg – Magnésio; Ca – Cálcio.

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 et al. (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_c = Nível de corte;

V_j = Valor observado.

Em seguida foi realizada a análise geoestatística para cada atributo por meio do ajuste do semivariograma. 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). A análise de dependência espacial foi obtida conforme a Equação 2:

$$ADE = \frac{C}{C_0 + C} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

ADE: Avaliador de dependência espacial;

C: Variância estrutural;

C₀: Efeito pepita;

C₀+C: Patamar.

Para a análise do avaliador de dependência espacial 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%.

As variáveis que apresentaram dependência espacial foram submetidas à 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 entre 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 e exploratória dos dados foi realizada por meio de planilhas eletrônicas, a análise geoestatística no software GS+ versão 7.0 e o detalhamento dos mapas no software Surfer 13.

Resultados e Discussão

Os resultados referentes à análise descritiva para os teores dos atributos químicos pH, Fósforo (P), Matéria Orgânica (MO), Saturação por Base (SB), Capacidade de troca Catiônica (CTC), Potássio (K), Magnésio (Mg) e Cálcio (Ca), estão apresentados na Tabela 2. O atributo Potássio (K), apresentou assimetria negativa, enquanto os demais, assimetria positiva. Segundo Isaaks e Srivastava (1989) o coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos do que a média e o desvio padrão, uma vez que um único valor pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo, de uma lavoura de tomate industrial.

Atributos	M	MD	VAR	DP	CV	Curt.	Ass.	Min.	Max.
pH	5,01	5,00	0,11	0,33	6,57	0,88	0,61	4,40	6,30
P	12,90	9,00	93,87	9,69	75,11	3,68	1,89	3,00	52,00
MO	19,36	20,00	24,47	4,95	25,55	0,02	0,16	7,00	31,00
SB	53,78	53,00	165,65	12,87	23,93	-0,67	0,11	28,00	86,00
CTC	5,65	5,69	1,11	1,05	18,67	0,02	0,07	2,87	8,43
K	0,31	0,31	0,01	0,08	26,38	-0,78	-0,31	0,13	0,45
Mg	0,29	0,20	0,03	0,16	56,31	0,37	0,96	0,10	0,80
Ca	2,47	2,30	0,84	0,92	37,05	1,16	0,91	1,00	6,10

pH – potencial hidrogeniônico; P – fósforo (mg dm^{-3}); MO – matéria orgânica (g kg^{-1}); CTC – capacidade de troca catiônica (cmolc dm^{-3}); SB – Saturação por bases ($\text{V}\%$); K – Potássio (cmolc dm^{-3}); Mg – Magnésio (cmolc dm^{-3}); Ca – Cálcio (cmolc dm^{-3}); M – média; MD – mediana; VAR – variância; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação ($\%$); Curt. – curtose; Ass. – assimetria; Min. – mínimo; Max. – máximo.

O pH desse solo foi em média de 5,01, está abaixo do recomendado para a cultura de tomate industrial (5,5 a 6,5) (SILVA et al., 2012). Podendo oferecer danos ao desenvolvimento da cultura, devido à elevada concentração de elementos potencialmente tóxicos, como alumínio e manganês. O teor de matéria orgânica do solo também foi considerado baixo podendo estar relacionado à rotação de culturas, prática essa essencial para o sistema de plantio direto, esta deficiência pode prejudicar diversos benefícios físicos, químicos e biológicos do solo (ALVAREZ et al., 1999).

O teor médio de fósforo ($12,9 \text{ mg dm}^{-3}$), está abaixo do recomendado pela Comissão de Fertilidade de Solos de Goiás (1988). 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. Os teores de cálcio e magnésio foram encontrados na proporção média de 2,47 e $0,29 \text{ cmolc dm}^{-3}$, 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, teve um coeficiente de variação médio (37,05%) mostrando a uniformidade da distribuição de cálcio no solo.

A Tabela 3 apresenta o resultado da análise geoestatística com os modelos ajustados aos semivariogramas para os atributos químicos do solo. O Avaliador de Dependência Espacial (ADE) encontrado do fósforo foi (83.6%), considerado como forte. O teor de fósforo para esse solo está de acordo com o recomendado, promovendo a rápida formação e crescimento de raízes, melhorando a qualidade dos frutos e contribuindo para o aumento do peso médio dos frutos (SILVA et al., 2012). A ausência de dependência espacial foi identificada nos atributos pH, matéria orgânica do solo, saturação de bases, capacidade de troca catiônica, potássio, magnésio e cálcio (Tabela 3).

Tabela 3. Modelos teóricos de semivariogramas ajustados para atributos químicos do solo.

Variáveis	Modelo	Alcance (A)	Patamar (C ₀ +C)	Efeito Pepita (C ₀)	ADE (C ₀ /(C ₀ + C))	R ²	SQR
pH	EPP*	—	—	—	—	—	—
P	Gaussiano	72	0,1546	0,0253	0,836	0,599	1,19E+03
MO	EPP*	—	—	—	—	—	—
SB	EPP*	—	—	—	—	—	—
CTC	EPP*	—	—	—	—	—	—
K	EPP*	—	—	—	—	—	—
Mg	EPP*	—	—	—	—	—	—
Ca	EPP*	—	—	—	—	—	—

ADE - avaliador de dependência espacial; R² - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrado dos resíduos; EPP* - efeito pepita puro; pH – potencial hidrogeniônico; P – fósforo (mg dm⁻³); MO – matéria orgânica (g kg⁻¹); CTC – capacidade de troca catiônica (cmolc dm⁻³); SB – Saturação por bases (V%); K – Potássio (cmolc dm⁻³); Mg – Magnésio (cmolc dm⁻³); Ca – Cálcio (cmolc dm⁻³).

A Figura 2(a) apresenta o semivariograma do atributo fósforo (P) que apresentou dependência espacial. A Figura 2(b) apresenta o mapa de probabilidade de ocorrências do atributo fósforo. Entre as 8 variáveis analisadas, apenas o fósforo apresentou dependência espacial, sendo que o melhor modelo ajustado foi o gaussiano.

A Figura 2(b) apresenta a distribuição da incerteza probabilística de ocorrência de fósforo nesse solo. A ocorrência de teores de fósforo apresentou maior probabilidade de encontrar teores acima do valor de referência de 20 mg dm⁻³ em diversos pontos do mapa, mais concentrada especificamente na região central. Essa probabilidade de ocorrência do fósforo, estar mais concentrada nessa região pode ser explicada pelo fato do solo apresentar boa fertilidade nessa região, enquanto nas

outras regiões apresenta deficiência desse nutriente. Assim, pode ser indicada a correção com adição de maiores quantidades de fertilizantes a base de fósforo nessa região para melhor desenvolvimento das plantas.

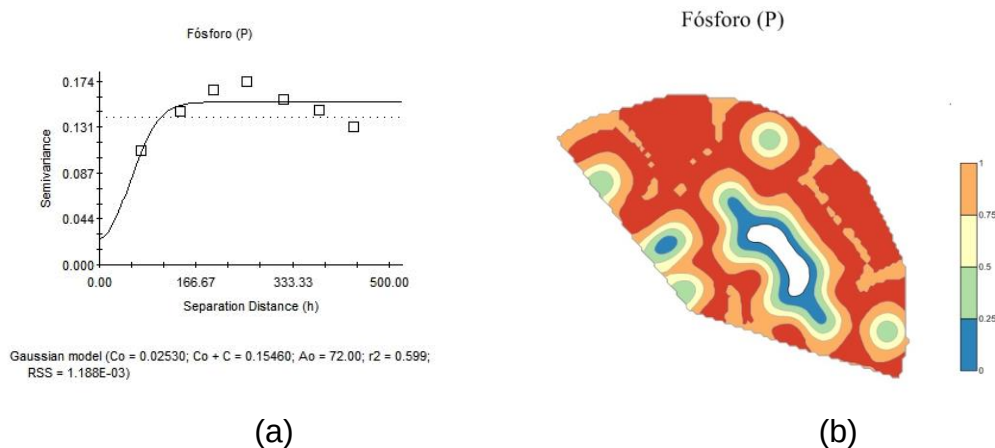


Figura 2. (a) Semivariograma do atributo, fósforo (P); (b) Mapa de probabilidade de ocorrência do atributo fósforo (P).

Considerações Finais

A probabilidade de ocorrência do atributo fósforo apresentou dependência espacial considerada forte e os demais atributos efeito pepita puro.

O mapa probabilístico mostrou que a região central apresentou maior fertilidade para teores de atributos do fósforo, e a deficiência nas demais áreas tendo necessidade de correção do solo.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Goiás (UEG) pela concessão da bolsa de iniciação científica.

A UEG/CCET pelo apoio para realização da pesquisa.

Ao produtor Félix Afonso Fleury Curado e ao gerente Moacir Fleury pela disponibilização da área experimental e pelas informações cedidas ao longo da realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. 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.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.415-422, 2007.

BURAK, D.L.; SANTOS, D.A.; PASSOS, R.R. Variabilidade espacial de atributos físicos: relação com relevo matéria orgânica e produtividade em café conilon. **Coffee Science**, Lavras, v.11, n.4, p.455-466, 2016.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLOS DE GOIÁS. **Recomendações de corretivos e fertilizantes para Goiás: 5ª aproximação**. Goiânia, UFG/EMGOPA, 1988. 101p. (Convênio. Informativo Técnico, 1).

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.

HOTT, M. O.; LIMA, V. L. S.; PEREIRA, L. R.; SOUZA, J. M.; REIS, E. F. Produção de biomassa na fase vegetativa do tomateiro em função da tensão de água no solo, **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.10, n.18, p. 2389-2398, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, Rio de Janeiro, v.29, n.12, p.1-82, 2016.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistic**. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R. **Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas de probabilidades de riscos**. DGA, IGCE, UNESP / Rio Claro, Lab.Geomatemática, Texto Didático 06, 19 p. 2002.

MILANI, L.; SOUZA, E.G.; URIBE-OPAZO, M.A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J. A.; PEREIRA, J.O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.2, p.591-598, 2006.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M., DALCHIAVON, F.C.; LOVERA, L.H.; HONORATO, M.A.O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 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.

SILVA, A.F.; QUARTEZANI, W.Z.; ZIMBACK, C.R.L.; LANDIM, P.M.B. **Aplicação da Geoestatística em Ciências Agrárias**. II Simpósio de Geoestatística aplicada a Ciências Agrárias, Botucatu-SP, 2011.

SILVA, J.; GUEDES, I.M.R.; LIMA, C.E.P. **Adubação e nutrição**. IN: CLEMENTE, F. M.V.T.; BOITEUX, L. Produção de Tomate para processamento industrial. Brasília: Embrapa, 2012.

WORLD PROCESSING TOMATO COUNCIL. **World production estimate of tomatoes for processing**. Disponível em:
<<https://www.wptc.to/pdf/releases/WPTC%20World%20Production%20estimate%20as%20of%208%20February%202017.pdf>>. Acesso em: 09 ago. 2017.