

CONTINUIDADE ESPACIAL PARA CARACTERÍSTICAS DE SOLOS EM SEIS TALHÕES DE CANA-DE-AÇUCAR

Izabela Regina Cardoso de Oliveira¹, Lucas Rios do Amaral²

Resumo: *A agricultura de precisão visa o gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo. Um exemplo de sua aplicação é na dosagem de adubos e defensivos a partir de dados específicos de áreas geograficamente referenciadas e automação agrícola. Variáveis como capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por base (V%) são características de solo diretamente relacionadas com fertilidade e pH. Conhecer o comportamento dessas variáveis ao longo de uma área cultivada é importante na recomendação de adubação e calcário em taxas variáveis. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi estudar a continuidade espacial dessas variáveis em seis talhões de cana-de-açúcar situados na região de Ribeirão Preto (SP), utilizando geoestatística. Todas as análises foram feitas no pacote geoR (RIBEIRO JR e DIGGLE, 2001). Foram realizadas análises exploratórias não espaciais e espaciais. O modelo geoestatístico foi ajustado pelo método da máxima verossimilhança e mapas de krigagem foram obtidos para áreas em que as variáveis foram espacialmente correlacionadas. Os valores das variáveis nos pontos amostrados e aqueles preditos em pontos vizinhos indicam a quantidade de calcário necessária. Dessa forma, a aplicação é feita em taxa variável, evitando excessos de químicos, alcançando economia em custos de insumos e equilíbrio com o meio ambiente.*

Palavras-chave: *Agricultura de precisão, geoestatística, máxima verossimilhança, geoR.*

1 Introdução

Agricultura de precisão é uma prática agrícola na qual utiliza-se tecnologia de informação baseada no princípio da variabilidade de uma área cultivada. Trata-se de um sistema de manejo integrado de informações e tecnologias, fundamentado nos conceitos de que as variabilidades de espaço e tempo influenciam nos rendimentos dos cultivos. A agricultura de precisão visa o gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo e não somente das aplicações de insumos ou de mapeamentos diversos (EMBRAPA, 2011). Um exemplo de sua aplicação é na dosagem de adubos e defensivos a partir de dados específicos de áreas geograficamente referenciadas e automação agrícola. O objetivo dessa prática é fornecer condições ideais às espécies cultivadas na agricultura.

Um vasto conjunto de ferramentas é utilizado na agricultura de precisão como o GNSS (Global Navigation Satellite System), o SIG (Sistema de Informações Geográficas), instrumentos e sensores para medidas ou detecção de parâmetros ou de alvos de interesse no agroecossistema (solo, planta, insetos e doenças), geoestatística e mecatrônica.

A capacidade de troca catiônica (CTC) é utilizada como medida de fertilidade nos solos, ou seja, como capacidade de retenção de nutrientes. Em geral, quanto maior a quantidade de

¹Departamento de Ciências Exatas (LCE), Esalq/USP, bela_line@yahoo.com.br

²Departamento de Fitotecnia, gMAP - Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão, Esalq/USP, lucasamaral@agronomo.eng.br

matéria orgânica no solo, maior a CTC. Em solos argilosos há maiores quantidades de matéria orgânica, o que não ocorre em solos arenosos. Em algumas áreas os níveis de pH do solo deve ser corrigidos, o que usualmente é feito com calcário. Entretanto, quando a CTC é alta, o solo possui maior “poder de tampão”, ou seja, é mais resistente à mudança de pH. Dessa forma a quantidade de calcário aplicada na correção deve ser maior.

O conceito de saturação por base (V%) está relacionado ao fornecimento de bases (Ca, Mg, K) em níveis ótimos para o desenvolvimento das plantas (McLean, 1977 citado por FAGERIA, 2001). Busca-se criar relações ideais de Ca, Mg e K no solo para a produção máxima das culturas. Segundo Fageria (2001) a calagem é uma das práticas mais comuns e para aumentar a produção agrícola, principalmente em solos ácidos. O uso adequado de calcário é fundamental para aumentar a produção e reduzir custos. Estudos apontaram que no estado de São Paulo a saturação por bases está diretamente relacionada ao pH. Dessa forma, onde há altos níveis de V% não é necessário aplicar muito calcário, pois o solo não está muito ácido.

Conhecer o comportamento dessas variáveis ao longo de uma área cultivada é importante na recomendação de adubação e calcário em taxas variáveis. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi estudar a continuidade espacial das variáveis CTC e saturação por bases em seis talhões de cana-de-açúcar situados na região de Ribeirão Preto (SP) e buscar uma diferenciação entre o comportamento espacial das mesmas em dois tipos de solos diferentes.

Para investigar as continuidades espaciais foram utilizados modelos geoestatísticos e todas as análises foram desenvolvidas no sistema R (R Development Core Team, 2011), utilizando o pacote geoR (RIBEIRO JR e DIGGLE, 2001).

2 Áreas de estudo

Os dados analisados neste trabalho foram coletados em seis talhões de cana-de-açúcar, localizados na usina São Martinho, município de Padrópolis, região de Ribeirão Preto (SP). As seis áreas são caracterizadas por dois tipos de ambientes, A e B (PRADO, 2007). Áreas de ambiente A (área 1, área 2, área 5 e área 6) apresentam boa fertilidade e grande acúmulo de água. Já áreas de ambiente B (área 3 e área 4) apresentam baixa fertilidade e baixa retenção de água.

As áreas de ambiente A possuem tipo de solo latossolo vermelho e são chamadas de solo argiloso, enquanto nas áreas de ambiente B os tipos de solo são neossolo quartzarênico (Área 3) e latossolo vermelho amarelo (Área 4), sendo chamadas de solo arenoso.

A área 1 (8,9ha) contém a variedade RB855453 em segundo corte, a área 2 (10,7ha) também contém RB855453, mas em quarto corte; a área 3 (11,4ha) contém a variedade CTC2 em segundo corte e a área 4 (11,1ha) também contém CTC2, mas em terceiro corte; a área 5 (9,8ha) contém RB855156 em terceiro corte e a área 6 (10,7ha) contém RB855453 em terceiro corte. Os dados referentes às áreas 1, 2, 3 e 4 foram coletados em 2009 enquanto os dados referentes à 5 e 6 foram coletados em 2010. A Figura 1 mostra o contorno das seis áreas estudadas.

No processo de amostragem cada área foi controlada por GPS e foi feita uma grade regular de cerca de 1/2ha. Em um raio de 5m a partir do ponto central de cada grade foram coletadas 8 subamostras de solo (amostragem composta), numa profundidade de 0 – 20cm. As subamostras foram misturadas, uma quantidade foi retirada da mistura e enviada para análises de laboratório. Os resultados dessas análises são os valores das variáveis em cada ponto.

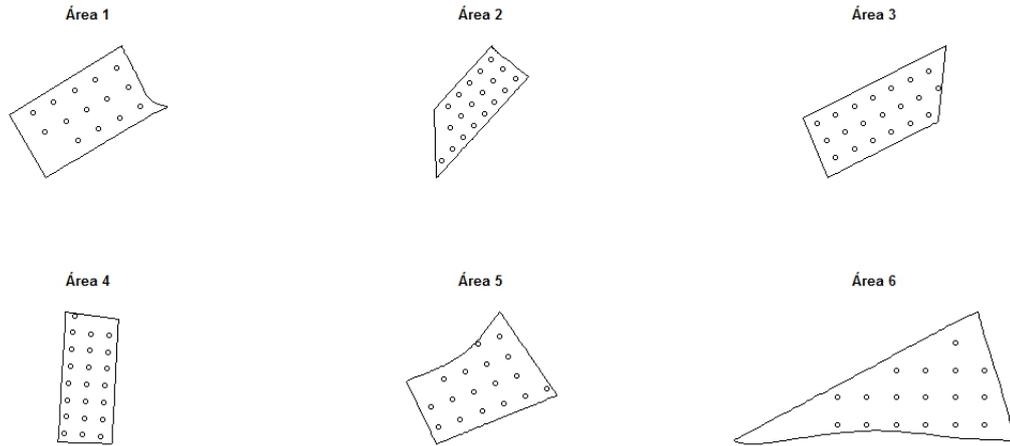


Figura 1: Contornos dos talhões de cana-de-açúcar estudados, localizados na usina de São Martinho, Padrópolis (SP)

3 Análise exploratória não espacial

A análise exploratória de dados é uma etapa essencial em qualquer tipo de análise estatística. Especificamente na geoestatística, a análise exploratória espacial pode apontar indícios de correlação espacial bem como de violação das pressuposições necessárias para a estimação adequada do modelo. Mas, como sugerido por Diggle e Ribeiro Jr (2007), inicialmente é importante realizar uma análise exploratória não espacial e investigar algumas características básicas dos dados.

Durante a análise exploratória não espacial foram estudadas as formas das distribuições das variáveis, a presença de pontos discrepantes ou *outliers* e o ajuste da distribuição normal aos dados. Todas as análises contemplaram as seis áreas de estudo. Na Figura 2 são apresentados os histogramas para a variável CTC nas seis áreas. Nota-se pequenos desvios de simetria em todas as situações, mas a existência de *outliers* pode ser detectada nas áreas 4 e 5. Esses pontos discrepantes também foram mostrados nos gráficos box-plot obtidos (resultados não apresentados). Na Figura 3 estão apresentados os histogramas para a variável saturação por bases. Nessa situação os desvios de simetria são mais marcantes. Pela análise pelos gráficos box-plot dessa variável notou-se a presença de *outliers* apenas na área 2.

Segundo Diggle e Ribeiro Jr (2007), as formas dos histogramas de dados geoestatísticos, ou seja, de uma amostra correlacionada, são menos estáveis que uma amostra aleatória independente, limitando o valor dessa ferramenta como diagnóstico de não-normalidade. Esse fato pode ser constatado na Tabela 1, em que são apresentados os valores descritivos de probabilidade para o teste de normalidade Shapiro-Wilk. A hipótese nula de normalidade só é rejeitada, considerando o nível de 5% de significância, para a variável CTC na área 5.

Para corrigir os efeitos de pontos discrepantes nos dados e aproximar a distribuição normal aos valores da variável CTC na área 5, utilizou-se transformações Box-Cox. Quando necessária, essa ferramenta forneceu o suporte para usar o modelo Gaussiano como uma aproximação desses dados.

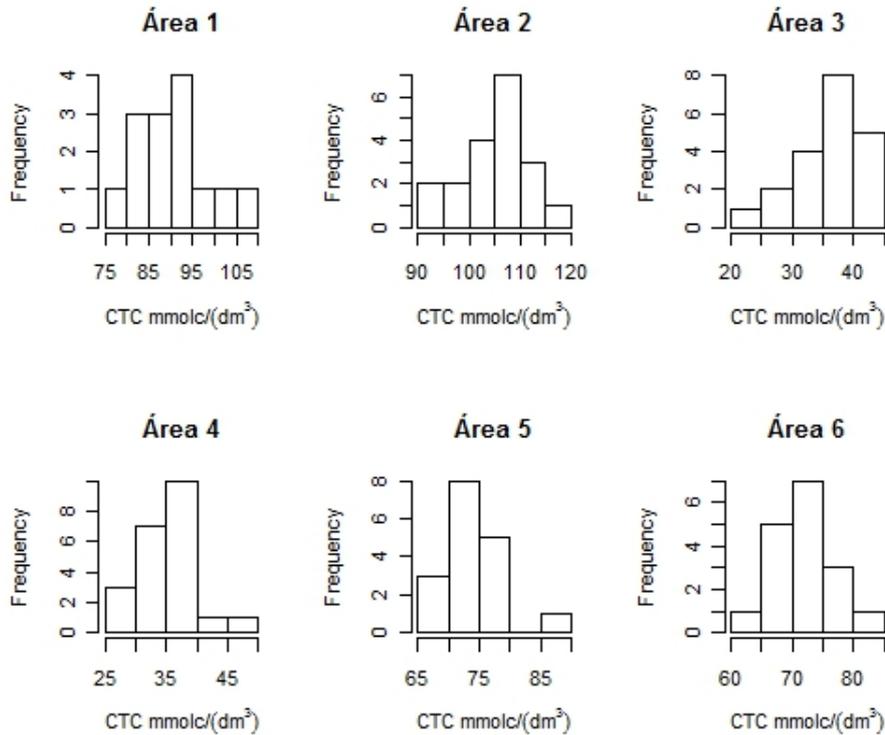


Figura 2: Histogramas para a variável CTC (mmolc/dm^3), considerando as seis áreas estudadas.

Tabela 1: Valores descritivos de probabilidade do teste de normalidade Shapiro-Wilk para as variáveis CTC (mmolc/dm^3) e saturação por bases (V%), considerando as seis áreas estudadas.

	CTC (mmolc/dm^3)		V%	
	W	Valor p	W	Valor p
Área 1	0,9723	0,9061	0,9079	0,1471
Área 2	0,967	0,7155	0,949	0,3806
Área 3	0,9734	0,8238	0,9377	0,2167
Área 4	0,9302	0,1242	0,9624	0,5392
Área 5	0,883	0,03557	0,9581	0,5952
Área 6	0,9629	0,6865	0,9352	0,2656

4 Análise exploratória espacial

Diggle e Ribeiro Jr (2007) definem como primeiro estágio em uma análise espacial a investigação gráfica da variável resposta em relação às suas coordenadas. Essa inspeção possibilita detectar *outliers* e tendências espaciais. Os gráficos obtidos para as variáveis CTC e saturação por bases são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente. A coordenada X refere-se à longitude e a coordenada Y à latitude. Em relação a variável CTC, nota-se nas áreas 1 e 3 um comportamento semelhante entre os pontos mais próximos. Por outro, nas áreas 4 e 6 o comportamento de alguns pontos é muito diferente de seus vizinhos, indicando a presença de *outliers* espaciais.

Em relação a variável saturação por bases nota-se que não há claros indícios de correlação espacial, a não ser na área 6. Vale destacar também a detecção de tendência espacial na área

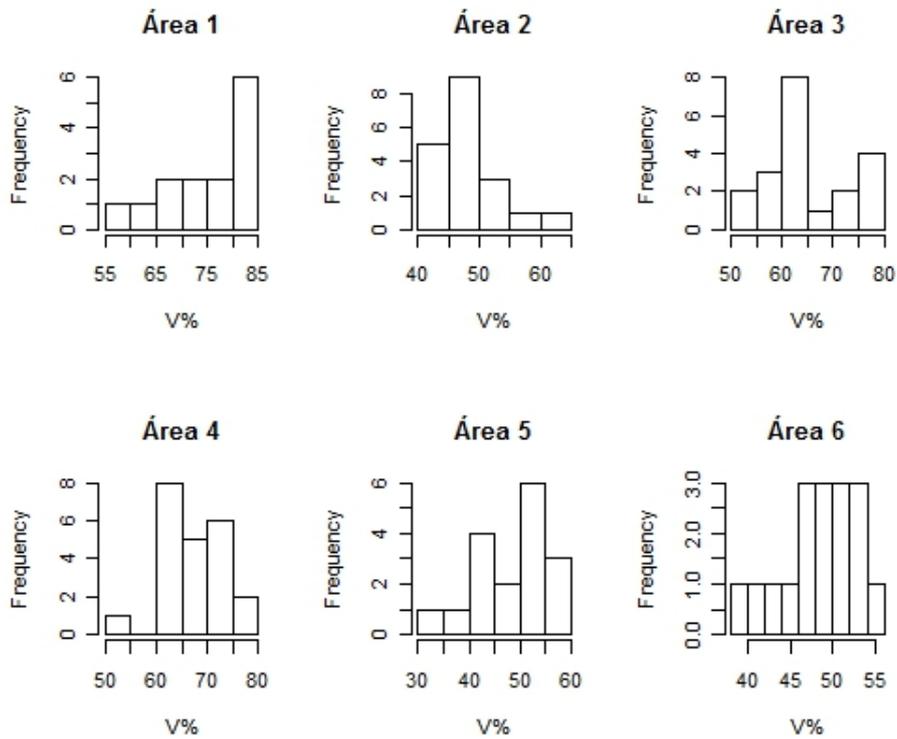


Figura 3: Histogramas para a variável saturação por bases (V%), considerando as seis áreas estudadas.

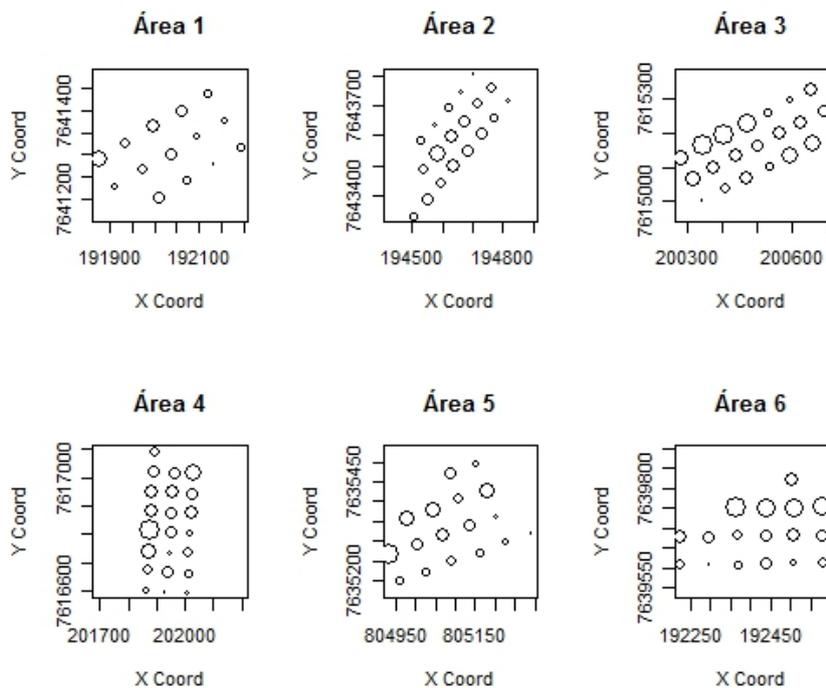


Figura 4: Gráfico de círculos representando os pontos amostrados em suas coordenadas específicas, considerando a variável CTC (mmol/dm^3) nas seis áreas estudadas

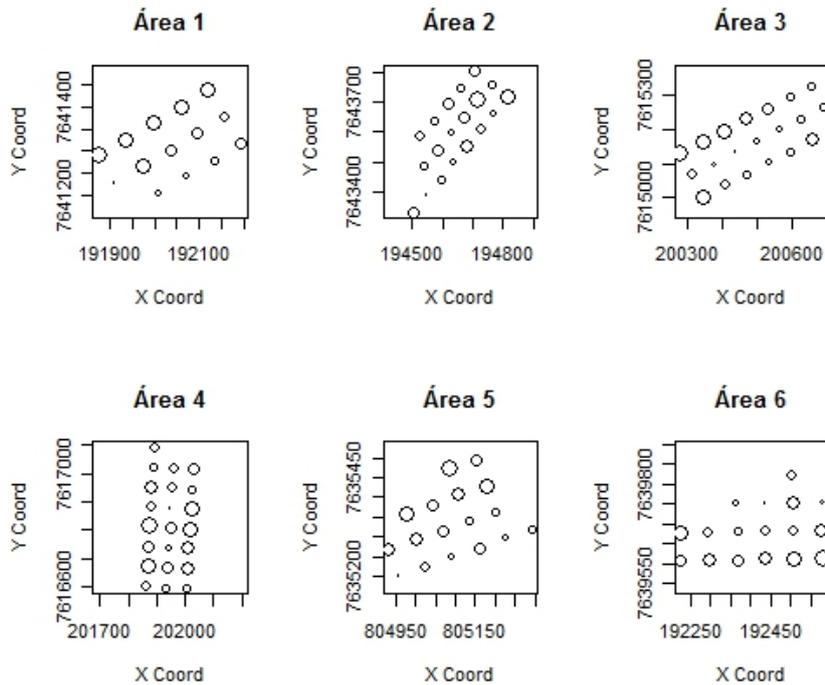


Figura 5: Gráfico de círculos representando os pontos amostrados em suas coordenadas específicas, considerando a variável saturação por bases (V%) nas seis áreas estudadas

1, já que os maiores das valores da variável estão associados com altos valores da coordenada Y (latitude). Esse tipo de tendência pode ser claramente detectado em gráficos de dispersão da variável resposta contra cada uma das coordenadas espaciais.

Na figura 6 são apresentados esses gráficos de dispersão para as áreas em que foi identificado algum tipo de tendência, sendo ambas de solo tipo argiloso. Apesar de ocorrer nas quatro situações, a tendência é mais perceptível ao longo da coordenada Y (latitude), para ambas as variáveis. O efeito dessa tendência nas duas áreas foi considerado no ajuste do modelo, usando uma superfície de tendência linear para descrever a variação espacial da média.

Como discutido por Diggle e Ribeiro Jr (2007), idealmente o modelo de um tendência deve ter uma interpretação física natural. No caso de saturação por bases a tendência ao longo da coordenada Y pode ser explicada pela declividade existente em alguns terrenos. Quando a adubação ou correção do solo é aplicada em um tipo de superfície soca, ou seja, em superfície do solo sem incorporação ou preparo, os granos de adubo ficam na superfície e são susceptíveis à ação de chuvas, podendo ser carregados por escoamento superficial até as áreas mais baixas. Esse fato influencia na diminuição dos valores da variável ao longo da coordenada.

Uma ferramenta útil na análise exploratória espacial é o variograma empírico. Conhecido também como semi-variograma, ele é um gráfico das variâncias das diferenças de distâncias entre todos os pares de pontos (v_{ij}) contra as distâncias correspondentes. Espera-se que, com o aumento da distância entre os pontos, a correlação entre eles aproxime-se de zero e a esperança de v_{ij} aproxime-se de σ^2 .

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os variogramas das variáveis CTC e saturação por bases, respectivamente, considerando as seis áreas. Principalmente devido a pequena quantidade de

pontos amostrados dentro de cada área, os variogramas tornam-se pouco informativos em relação a possíveis correlações espaciais.

Nota-se que, em alguns casos, o variograma aproxima-se de zero para distâncias curtas. De acordo com Diggle e Ribeiro Jr (2007), quando isso ocorre indica que o comportamento das variáveis ao longo da área é medido com um erro pequeno em relação a sua variação espacial. Como sugerido pelos autores, os variogramas são usados neste trabalho apenas como umas ferramenta de análise exploratória e não como base para uma inferência formal. Para essas inferências será utilizado o método da máxima verossimilhança, cujos resultados serão apresentados na seção seguinte.

Para a variável CTC na área 1, o variograma é pouco informativo e, a princípio, não sugere a existência de correlação espacial na área. Entretanto, utilizando a técnica do envelope de variogramas empíricos computados de permutações aleatórias (resultados não apresentados), notou-se indícios dessa correlação. Por outro lado, para a mesma variável, nas áreas 3 e 4 os variogramas estão mais informativos.

Para a variável saturação por bases, com excessão da área 6, todos os demais variogramas estão decrescendo e não há estabilização aparente em distâncias mais longas. Como discutido anteriormente, resultados mais consistentes para as duas variáveis serão obtidos a seguir.

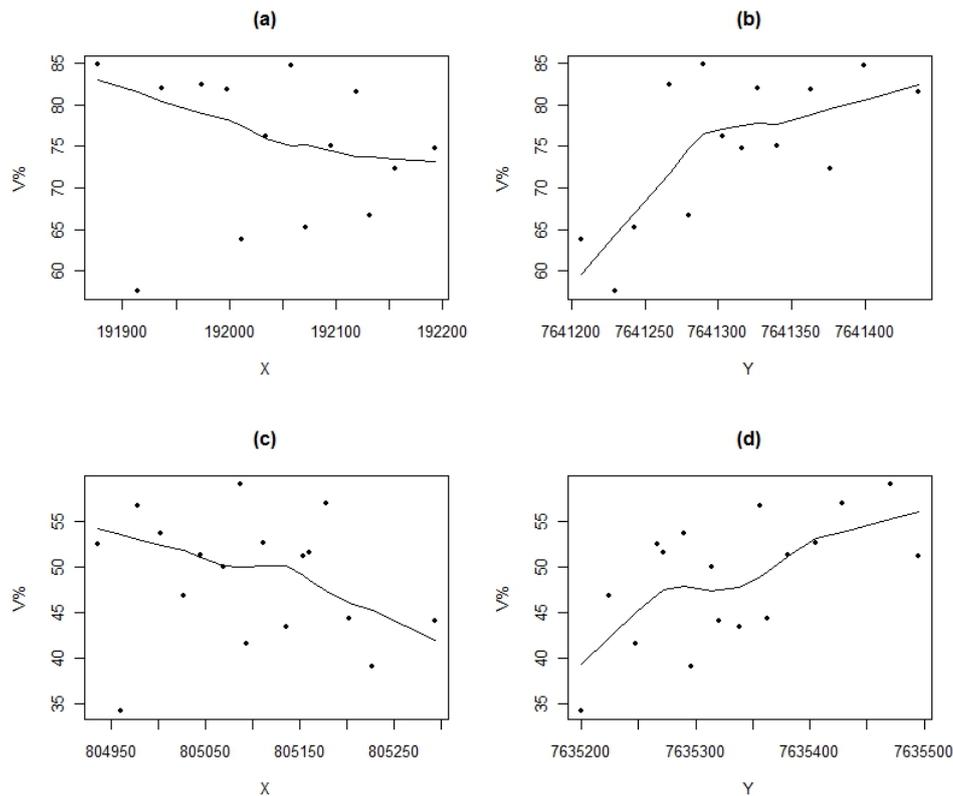


Figura 6: Relação entre saturação por bases (V%) e as coordenadas geográficas X e Y, considerando as áreas 1 (a e b) e 5 (c e d)

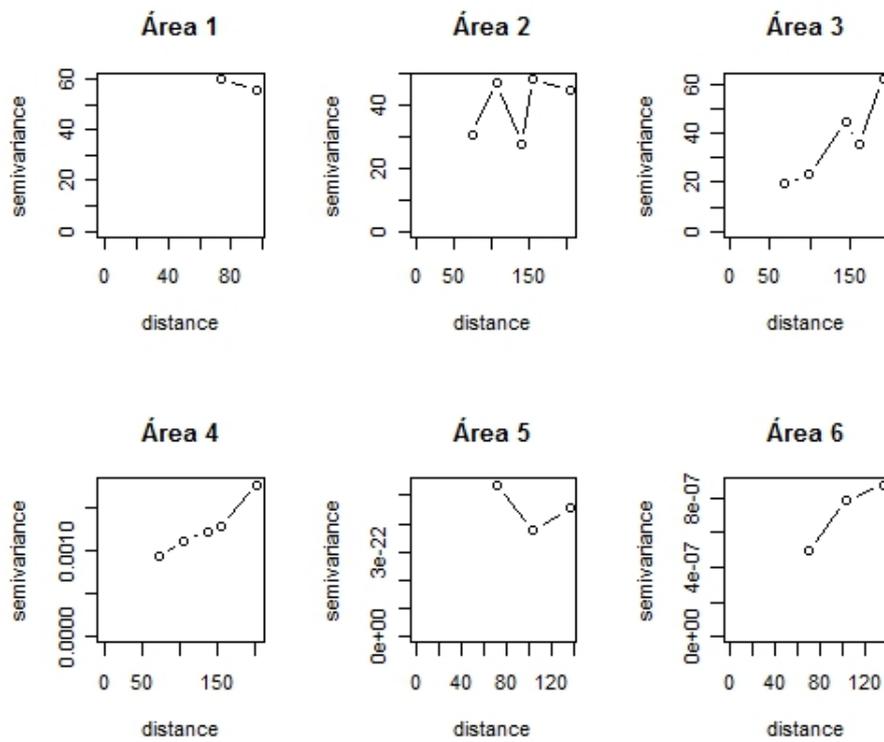


Figura 7: Variogramas amostrais para a variável CTC (mmol/dm^3), considerando as seis áreas estudadas

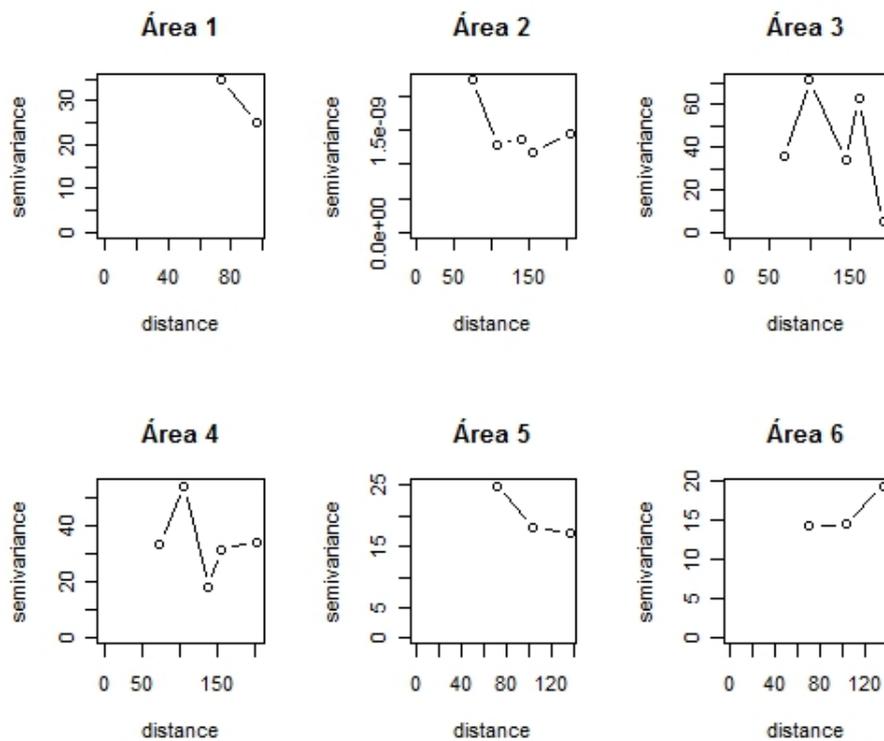


Figura 8: Variogramas amostrais para a variável saturação por bases (V%), considerando as seis áreas estudadas

5 Estimação dos parâmetros e predição espacial

Os parâmetros de um modelo geoestatístico podem ser estimados de diferentes maneiras, mas como discutido anteriormente optamos por usar neste trabalho o método da máxima verossimilhança. De acordo Gelfand et. al. (2010) com a estimação dos parâmetros pela combinação do método dos momentos com o método de mínimos quadrados é conhecida como a geoestatística clássica, são simples e não exigem pressuposições de distribuições. Entretanto, a aproximação dos parâmetros do modelo geoestatístico pelo método da máxima verossimilhança pode ter certas propriedades ótimas, sob condições de regularidade.

Segundo Diggle e Ribeiro Jr (2007) os parâmetros a serem estimados para um modelo Gaussiano estacionário são, basicamente, a média β e os outros parâmetros adicionais que definem a estrutura de covariância dos dados, que incluem a variância σ^2 , a variância do erro de medida, conhecida como “ruído” ou efeito-pepita τ^2 e uma ou mais função dos parâmetros de correlação ϕ .

Tanto para a variável CTC quanto para a saturação por bases foi assumido o modelo Gaussiano com função de correlação exponencial ($\kappa = 0,5$). As estimativas para os demais parâmetros nas seis áreas de estudo são apresentadas nas Tabelas 2 e 3. A análise exploratória da variável saturação por bases sugeriu um modelo com uma média não contante para as áreas 1 e 5. Dessa forma, uma superfície de tendência linear foi assumida e os parâmetros β_1 e β_2 aparecem em alguns modelos dessa variável (Tabela 3). Para a variável CTC foi detectada correlação espacial nas áreas 1, 2, 3 e 4, enquanto para a variável saturação por bases essa correlação existe nas áreas 3 e 6. Para essas situações foram obtidos os mapas de krigagem das variáveis (Figuras 9 e 10).

Tabela 2: Estimativas obtidas por máxima verossimilhança para os parâmetros β_0 , efeito-pepita (τ^2), variância (σ^2) e alcance (ϕ), considerando a variável CTC (mmolc/dm^3) nas seis áreas estudadas.

	β_0	τ^2	σ^2	ϕ
Área 1	90,43	0,00	70,93	31,40
Área 2	103,54	0,00	45,24	68,52
Área 3	35,27	0,00	31,81	70,46
Área 4	2,1827	0,0004	0,0012	133,5792
Área 5	0,2	0,00	0,00	0,00
Área 6	0,986	0,00	0,00	158,758

Tabela 3: Estimativas obtidas por máxima verossimilhança para os parâmetros β_0 , β_1 , β_2 , efeito-pepita (τ^2), variância (σ^2) e alcance (ϕ), considerando a variável saturação por bases (V%) nas seis áreas estudadas.

	β_0	β_1	β_2	τ^2	σ^2	ϕ
Área 1	$-8,3 \times 10^5$	$-4,190 \times 10^{-2}$	$1,097 \times 10^{-1}$	$2,771 \times 10^1$	0,00	0,00
Área 2	48,09	0,00	0,00	22,28	0,00	0,00
Área 3	66,91	0,00	0,00	0,00	53,25	63,71
Área 4	67,35	0,00	0,00	30,02	0,00	0,00
Área 5	$-4,465 \times 10^5$	$-2,980 \times 10^{-2}$	$6,160 \times 10^{-2}$	$1,997 \times 10^1$	0,00	0,00
Área 6	48,5147	0,00	0,00	0,9633	18,1376	49,7301

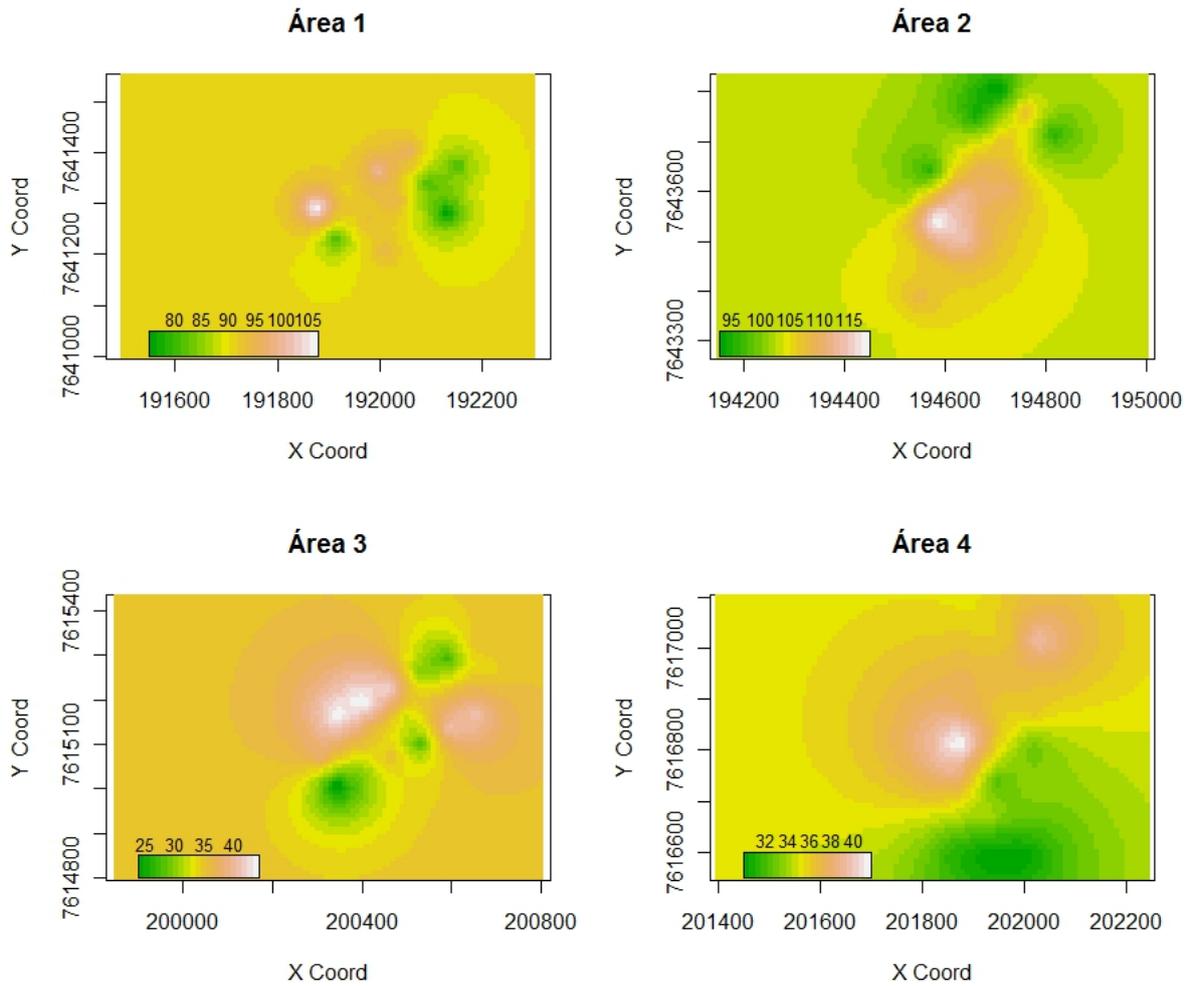


Figura 9: Mapas de krigagem gerados para a variável CTC (mmolc/dm³) em áreas nas quais foram detectadas estruturas de correlação espacial

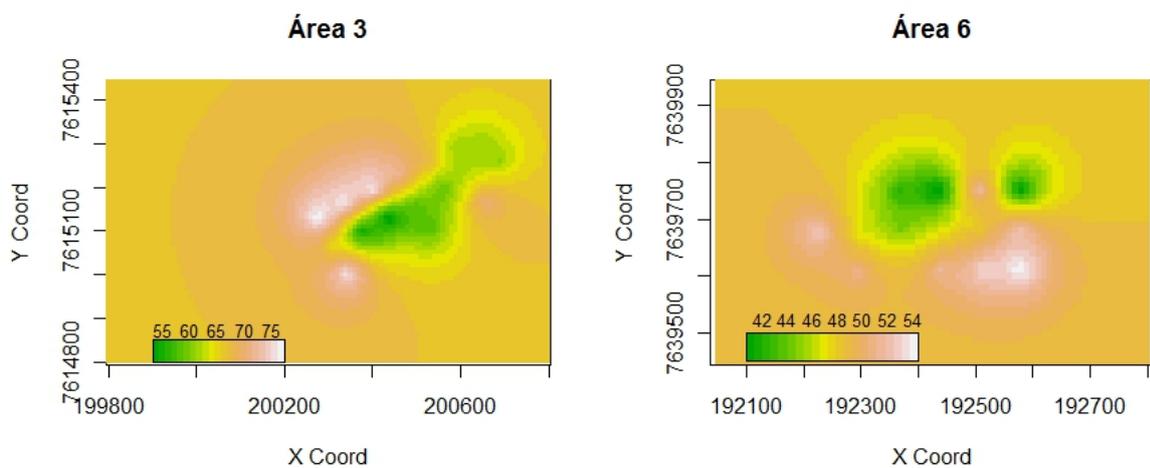


Figura 10: Mapas de krigagem gerados para a variável saturação por bases (V%) em áreas nas quais foram detectadas estruturas de correlação espacial

6 Discussão

Em relação a variável CTC, suas médias (β_0) são maiores em áreas com solo tipo argiloso. Isso já era esperado já que esse tipo de solo possui maior superfície específica, maior acúmulo de matéria orgânica e, conseqüentemente, maior CTC. Especificamente na área 4 a média da CTC foi muito baixa, seu alcance (ϕ) muito alto e a variância baixa. Pode-se afirmar que nesse local a CTC é baixa, de maneira geral, e a continuidade espacial é mais uniforme.

A não existência de correlação espacial em algumas áreas ($\phi = 0$) para ambas as variáveis pode ser explicada pelo tipo de amostragem realizado, com pontos muito espaçados, impossibilitando detectar a possível correlação existente.

Quanto à variável saturação por bases pode-se notar que as médias foram maiores no tipo de solo arenoso (área 3) do que no argiloso (área 6). Esse fato não é frequente, mas pode ocorrer em algumas situações como essa, devido a outros fatores não controlados. Geralmente espera-se que β_0 seja maior em solos do tipo argiloso. Além da média, a variância e o alcance também foram maiores no solo arenoso.

Não há uma distinção clara entre o comportamento das variáveis nos dois tipos de solo. Isso pode ser explicado pela pequena quantidade de áreas amostradas. Sugere-se um estudo que englobe mais áreas representando esses dois tipos de solo.

Os mapas de krigagem obtidos são muito importantes no planejamento da adubação ou correção do solo com calcário. Os valores das variáveis nos pontos amostrados e aqueles preditos em pontos vizinhos indicam a quantidade de material necessária. Dessa forma, a aplicação é feita em taxa variável, evitando excessos de químicos, alcançando economia em custos de insumos e equilíbrio com o meio ambiente.

7 Conclusão

O uso da geoestatística possibilitou a investigação do comportamento espacial das variáveis CTC e saturação por bases em algumas das áreas estudadas. Não foram detectadas diferenças entre as continuidades espaciais de solos do tipo arenoso e do tipo argiloso. Para que sejam detectadas sugere-se um novo estudo que considere um maior número de áreas de ambos os solos.

Recomendações de adubação e calcário em taxas variáveis podem ser feitas nas áreas para as quais foram obtidos os mapas de krigagem.

Referências

- [1] DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J., *Model-based Geostatistics*, Londres: Springer Series in Statistics, 2007, 230 p.
- [2] EMBRAPA, *Agricultura de precisão*. Disponível em: <http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2>. Acessado em 19/10/2011.

- [3] FAGERIA, N.K., Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. *Revista brasileira engenharia agrícola e ambiental*, Campina Grande, vol.5 no.3, Sept./Dec., 2001
- [4] GELFAND, A. E.; DIGGLE, P. J.; FUENTES, M.; GUTTORP, P., *Handbook of Spatial Statistics*, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC handbooks of modern statistical methods. 2010, 575 p.
- [5] MCLEAN, E. O., Contrasting concepts in soil test interpretation: Sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. *In: Stelly, M. (ed.) Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results*. Madison: American Society of Agronomy, 1977, p. 39-54
- [6] PRADO, H., *Pedologia Fácil Aplicações na Agricultura*, Piracicaba. 2007, 105 p.
- [7] R Development Core Team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- [8] RIBEIRO JR, P. J.; DIGGLE, P. J. , geoR: A package for geoestatistical analysis. *R-NEWS*, v. 1, n.2, p. 15-18, 2001