

Variabilidade espacial da condutividade elétrica em pomares de laranja

Natalia da Silva Martins¹, André Freitas Colaço², Paulo R. Justiniano Jr.³, Paulo Molin⁴

Resumo: *O mapeamento de atributos químicos por meio da geoestatística possibilita a identificação de possíveis áreas-problema, facilitando o manejo diferenciado, visando aumentar a produtividade e o lucro preservando a sustentabilidade do solo. O presente estudo tem como objetivo usar métodos estatísticos e geoestatísticos para avaliar a variabilidade espacial dos níveis de condutividade elétrica do solo, permitindo a aplicação de insumos agrícolas nos locais corretos e nas quantidades requeridas, reduzindo a quantidade de insumos, a contaminação ambiental por excesso de fertilizantes, os custos da produção e aumento da produtividade da lavoura. O experimento foi conduzido na Fazenda Quatrirmãs, no município de Botucatu-SP e as amostras coletadas por um sensor de condutividade elétrica. Os resultados experimentais mostraram que a condutividade elétrica do solo apresenta forte dependência espacial.*

Palavras-chave: *agricultura de precisão, variabilidade espacial, geoestatística.*

1 Introdução

Atualmente há uma necessidade do aumento da eficiência de todos os setores da economia globalizada para manter a competitividade e para a agricultura não poderia ser diferente. Logo, por meio dos avanços tecnológicos na agropecuária, especialistas têm notado que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de forma semelhantes no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas agrícolas. Com isto deu-se início a agricultura de precisão (AP), que é denominada por Batchelor *et al.* (1997) como uma filosofia de manejo da fazenda na qual os produtores são capazes de identificar a variabili-

¹ESALQ-USP, naty-martins@usp.com

²ESALQ-USP, andre.colaco@usp.br

³ESALQ-USP, paulojus@ufpr.br

⁴ESALQ-USP, jpmolin@usp.br

dade dentro do campo, e manejar tal variabilidade para aumentar a produtividade e o lucro preservando a sustentabilidade do solo.

Uma variável que tem atraído a atenção na AP é a condutividade elétrica (CE) do solo, habilidade que o solo tem em transmitir corrente elétrica, uma vez que esta depende do teor de água, porcentagem de argila, material de origem do solo, porosidade, concentração de eletrólitos na água dos poros, temperatura do solo, densidade, composição química da solução do solo, entre outros fatores (MOLIN, 2006). Neste sentido, o conhecimento da CE torna-se importante para a avaliação de tais variáveis, possibilitando a identificação de áreas-problema propondo um manejo diferenciado para tais áreas.

Este estudo de manejo diferenciado para as áreas de acordo com a EMBRAPA (1997) engloba o uso de tecnologias atuais para o manejo de solo, insumos e culturas, de modo adequado às variações espaciais e temporais destes fatores que afetam a produtividade.

Desta forma, no início da década de 90, começaram a ser desenvolvidas tecnologias e princípios para manejar tais variações espaciais e temporais associadas com os aspectos da produção agrícola, pois a produtividade das culturas varia de forma espacial, e determinar as causas dessas variações é o desafio enfrentado pela AP. No entanto, as variações espaciais podem ser estudadas por meio de técnicas geoestatística, as quais permitem a elaboração de mapas e delimitação de áreas de manejos diferenciados (FARIA, 2002a).

Nesse sentido, é relevante considerar as variações espaciais e temporais para que se possa realizar um manejo adequado às áreas. Para a representação dessas as variações espaciais e temporais, será utilizada a técnica geoestatística, que surgiu na África do Sul, quando o Engenheiro de Minas D. G. Krige, em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não era possível encontrar sentidos nas variâncias se não considerasse a distância entre as amostras.

Com isso, este trabalho objetiva usar métodos estatísticos e geoestatísticos para avaliar a variabilidade espacial dos níveis de condutividade elétrica do solo, permitindo a aplicação de insumos agrícolas nos locais corretos e nas quantidades requeridas, reduzindo a quantidade de insumos, a contaminação ambiental por excesso de fertilizantes, os custos

da produção e aumento da produtividade da lavoura.

2 Material e Método

2.1 Localização e descrição da área experimental

A área experimental está compreendida nas coordenadas geográficas: 22°57'26,35" de latitude Sul, 48°39'2,9" de longitude Oeste de Greenwich e altitude de 760 m (sede da fazenda), localizada na Fazenda Quatrimãs, no município de Botucatu-SP, com 25,7 hectares de solo arenoso e espaçamento de 7,5 x 3,5 metros. A área é caracterizada por fileiras de plantio bastante sinuosas e espaçamento tradicional diferente da tendência atual, de adensamento dos pomares de laranjas. A variedade cultivada na área é a Rubi, que é identificada como precoce na classificação de maturação do fruto.

2.2 Análise exploratória

A análise exploratória dos dados é um procedimento de grande importância na análise estatística, aplicando-se a toda metodologia que se queira utilizar. O objetivo desta análise é conhecer e resumir a variável em estudo por meio de interpretações gráficas e das medidas média, mediana, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose (BUSSAB e MORETTIN, 1987).

2.3 Análise de dependência espacial

Os procedimentos a serem descritos seguem a metodologia de Vieira *et al* (1983) e utiliza informações da posição da amostra e o valor que a variável (condutividade elétrica do solo) assume em cada ponto. Desta forma, de cada ponto de amostragem tem-se o valor da condutividade elétrica e as coordenadas do ponto onde foi realizada a amostragem.

2.3.1 Semivariograma

Ao se calcular o semivariograma, obtêm-se pares de valores de semivariâncias $\gamma(h)$ e distâncias (h), os quais serão dispostos em um gráfico de dispersão, tendo como valores de y , as semivariâncias, e de x , as distâncias. Para esses pontos, deve-se ajustar um modelo. Para propriedades espacialmente dependentes, espera-se que a diferença entre valores $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$, em média, aumente com a distância até um determinado ponto, a partir do qual se estabiliza em um valor, denominado patamar ($\tau^2 + \phi$) e aproximadamente igual a variância dos dados. Tal distância recebe o nome de alcance (ϕ) representando o raio de um círculo, dentro do qual os valores são tão parecidos uns com os outros que são correlacionados. O valor da semivariância na interseção do eixo Y tem o nome de efeito pepita (τ^2) e representa a variabilidade da propriedade em estudo em espaçamentos menores do que o amostrado. Desta forma, quanto maior o efeito pepita, menor é a dependência espacial de um atributo (VIEIRA *et al.*, 1983). O semivariograma é estimado por:

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

Em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de valores medidos $Z(x_i), Z(x_i + h)$, separados por um vetor h . O gráfico de $\gamma(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h e, portanto, depende da magnitude e direção de h .

Em relação ao grau de dependência espacial da variável em estudo, de acordo com Guimarães (2004), pode-se classificá-lo como:

- variável com forte dependência espacial: se o efeito pepita for menor ou igual a 25% do patamar, $\left(\frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} < 0.25\right)$;
- variável com moderada dependência espacial: se o efeito pepita representar entre 25% e 75% do patamar, $\left(0.25 < \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} < 0.75\right)$;
- variável com fraca dependência espacial: se o efeito pepita e patamar estiver entre

75% e 100%, $\left(0.75 < \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} < 1.00\right)$;

- variável independente espacialmente: se a relação entre o efeito patamar pepita for igual a 100%, semivariograma com efeito pepita puro, $\left(\frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} = 1.00\right)$.

Por meio do semivariograma é possível ajustar um modelo matemática que expressa a estrutura de dependência espacial das características avaliadas, os principais modelos são o linear com patamar, esférico, exponencial, gaussiano e sem patamar, maiores detalhes ver Matheron (1971). Com os dados obtidos em campo ajustou-se e selecionou-se o melhor modelo de função de semivariância para a variável em estudo, utilizando o Método da Máxima Verossimilhança. O semivariograma experimental e o ajuste dos modelos foram efetuados no sistema R, utilizando o pacote geoR (RIBEIRO JR. e DIGLLE, 2001).

2.3.2 Krigagem

Às vezes, o interesse da análise geoestatística não é apenas em modelar a estrutura de variabilidade. Em diversas situações, o interesse é a estimação de valores em pontos não amostrados, seja por um interesse local, seja pela intenção de obter um detalhamento da área que vai além do permitido pela amostra. Nestes casos, torna-se necessário lançar mão de algum interpolador (preditor), tais como média simples, distância inversa, Krigagem, entre outros.

A técnica da krigagem é um método de interpolação sofisticado, em que pesos são diretamente correlacionados à estrutura de correlação espacial detectada no semivariograma. Os mapas de krigagem para a variável resposta é apresentado a fim de ilustrar diferentes características espaciais existentes na área (VIEIRA, *et al.*, 1983). Esses mapas tornam-se bastante útil na identificação de regiões semelhantes, o que contribui de forma completa para o alcance do objetivo deste trabalho.

3 Resultados e Discussão

Para a análise dos dados de condutividade elétrica foram utilizadas 913 amostras coletadas a 0.30 m de profundidade em grades regulares na Fazenda Quatirmãs. Na análise exploratória dos dados detectou-se a falta de normalidade, sendo necessária uma transformação de Box-Cox para que esta fosse alcançada (Figura 1) e as análises prosseguidas.

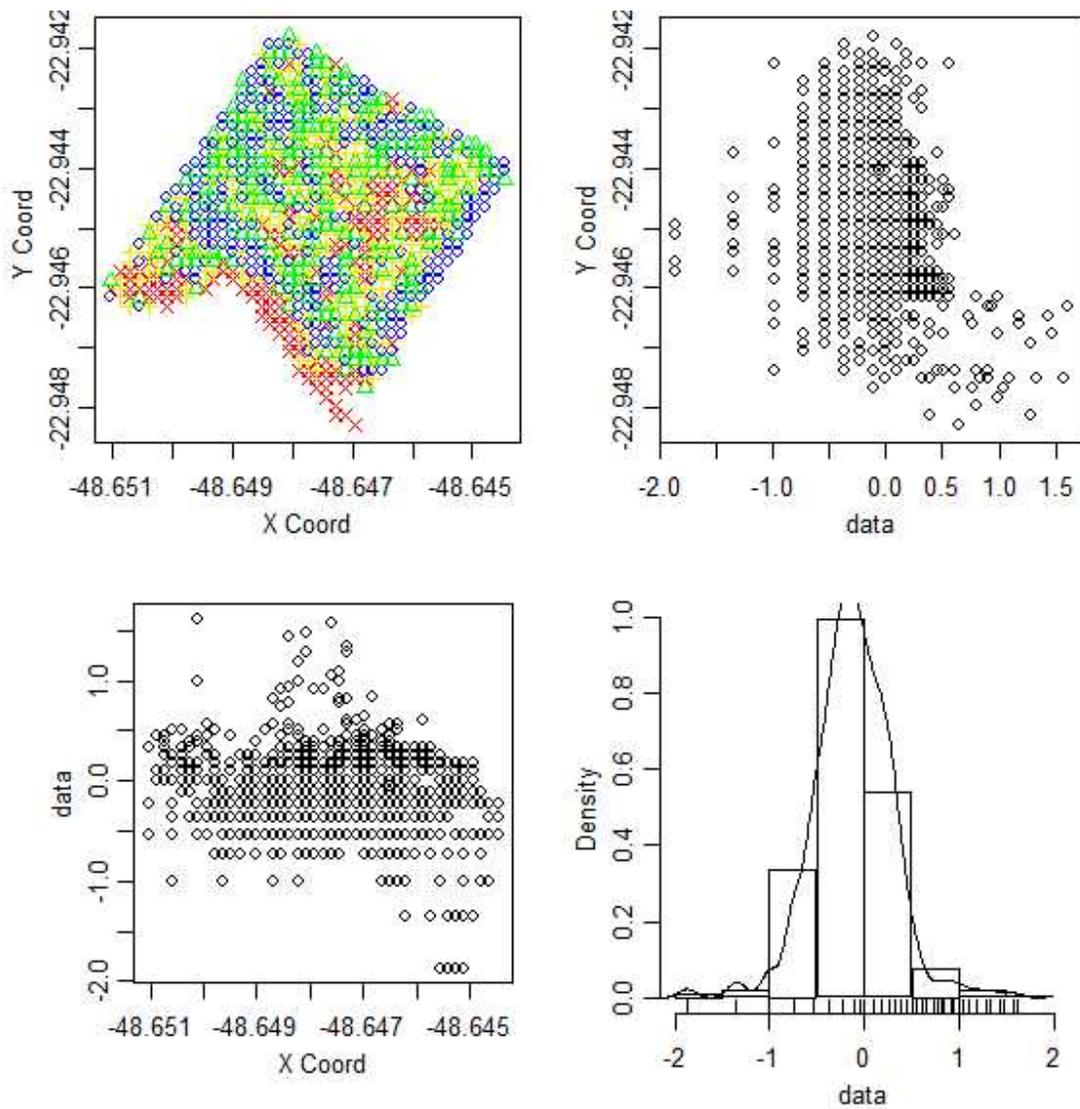


Figura 1: Análise exploratória para a CE do solo.

As estatísticas descritivas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Estatística descritiva dos dados analisados.

<u>Estatísticas</u>	<u>Estimativas</u>
Média	-0.1225
Mediana	-0.1064
Mínimo	-1.8720
Máximo	1.6190
Desvio padrão	0.5665
Variância	0.3210

Na Figura 2 é possível visualizar o semivariograma experimental e teórico do modelo exponencial e na Figura 3 o semivariograma experimental e teórico do modelo matern.

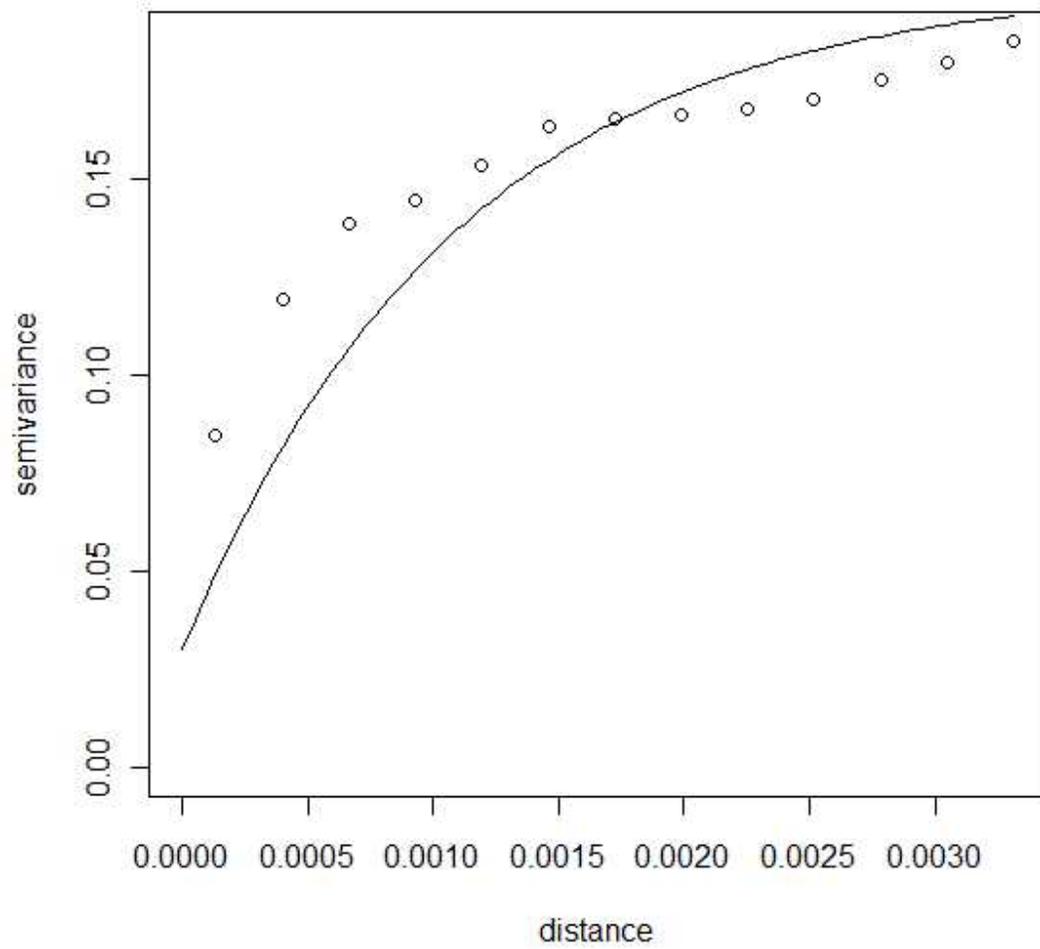


Figura 2: Semivariograma experimental e teórico para a CE do solo-modelo exponencial

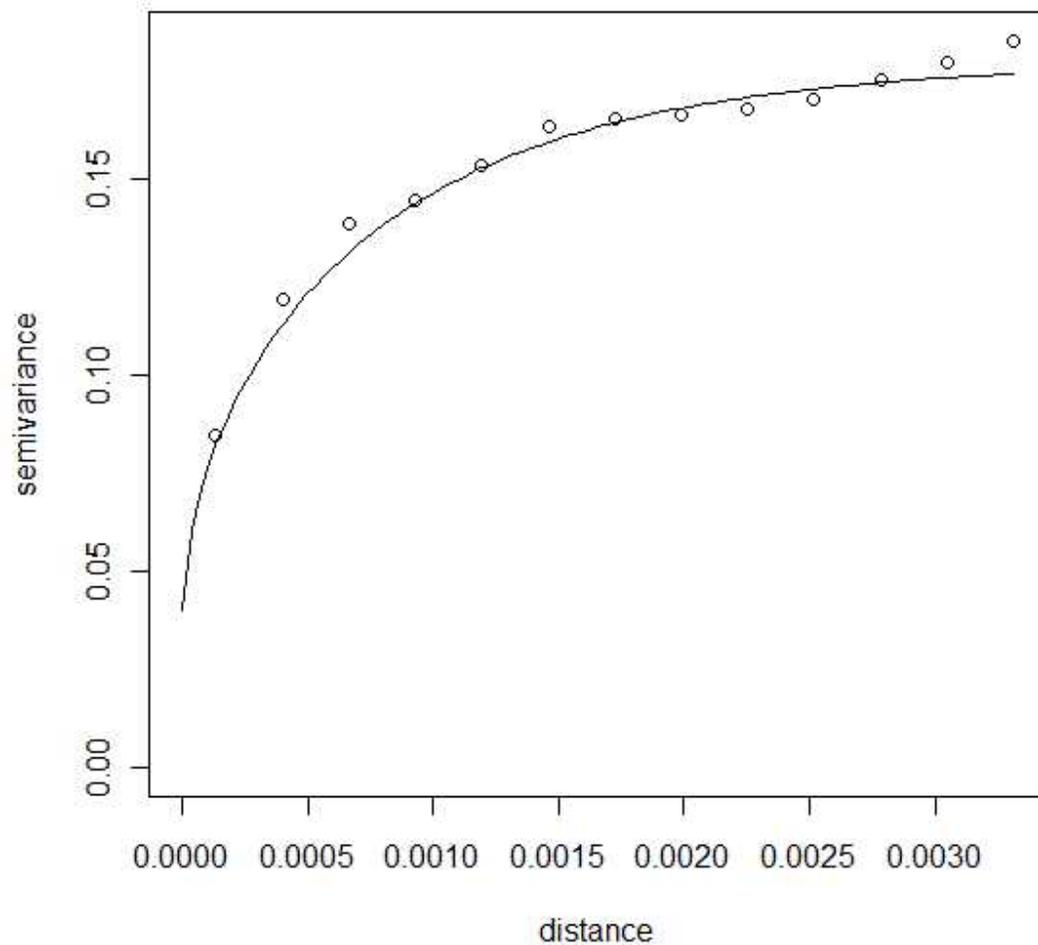


Figura 3: Semivariograma experimental e teórico para a CE do solo-modelo matern

Como pode-se observar nas Figuras 1 e 2 o modelo matern se ajustou de maneira mais adequada aos dados que o modelo exponencial. As log's verossimilhanças foram de -129 e -130.8 para o modelo matern e exponencial, respectivamente. Sendo assim, escolheu-se o modelo matern para a realização da krigagem, uma vez que este apresentou

melhor ajuste.

Com a escolha do modelo partiu-se para as estimativas dos parâmetros, as quais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Estimativa dos parâmetros β , efeito pepita (τ^2), variação estruturada (σ^2), alcance (ϕ), patamar ($\tau^2 + \sigma^2$) para a variável condutividade elétrica do solo.

Parâmetro	Estimativas
β	-0.1308
τ^2	0.0250
σ^2	0.2678
ϕ	0.0026
$\tau^2 + \sigma^2$	0.2928

Observa-se por meio dos valores do efeito pepita e do patamar uma forte dependência espacial, uma vez que ao se fazer $\frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} = 0.08$, sendo este menor que 0.25, (GUIMARÃES, 2004).

Por meio da técnica de krigagem, observa-se na Figura 4 o mapa de predição, gerado a partir do modelo obtido pelo método da máxima verossimilhança, da variável CE na área de estudo.

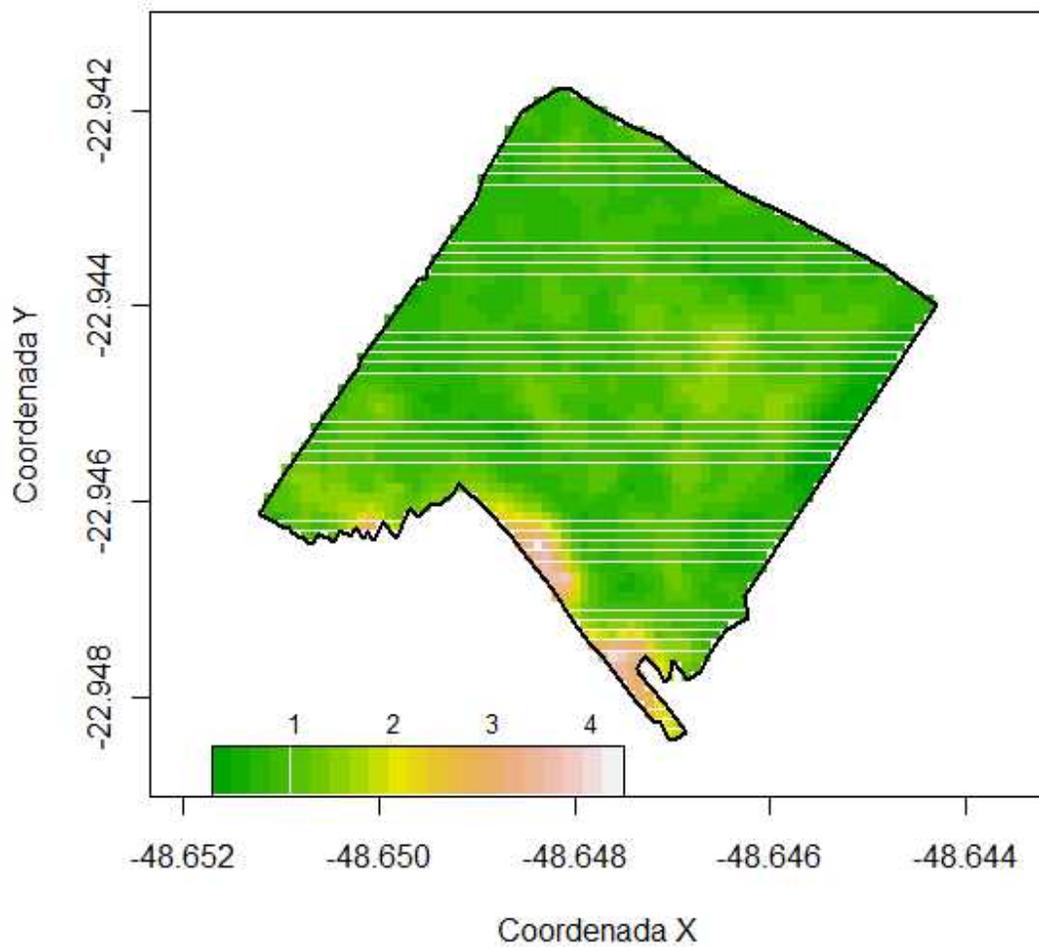


Figura 4: Mapa de krigagem da variável CE do solo.

Na Figura 5 observa-se o mapa de variância da krigagem.

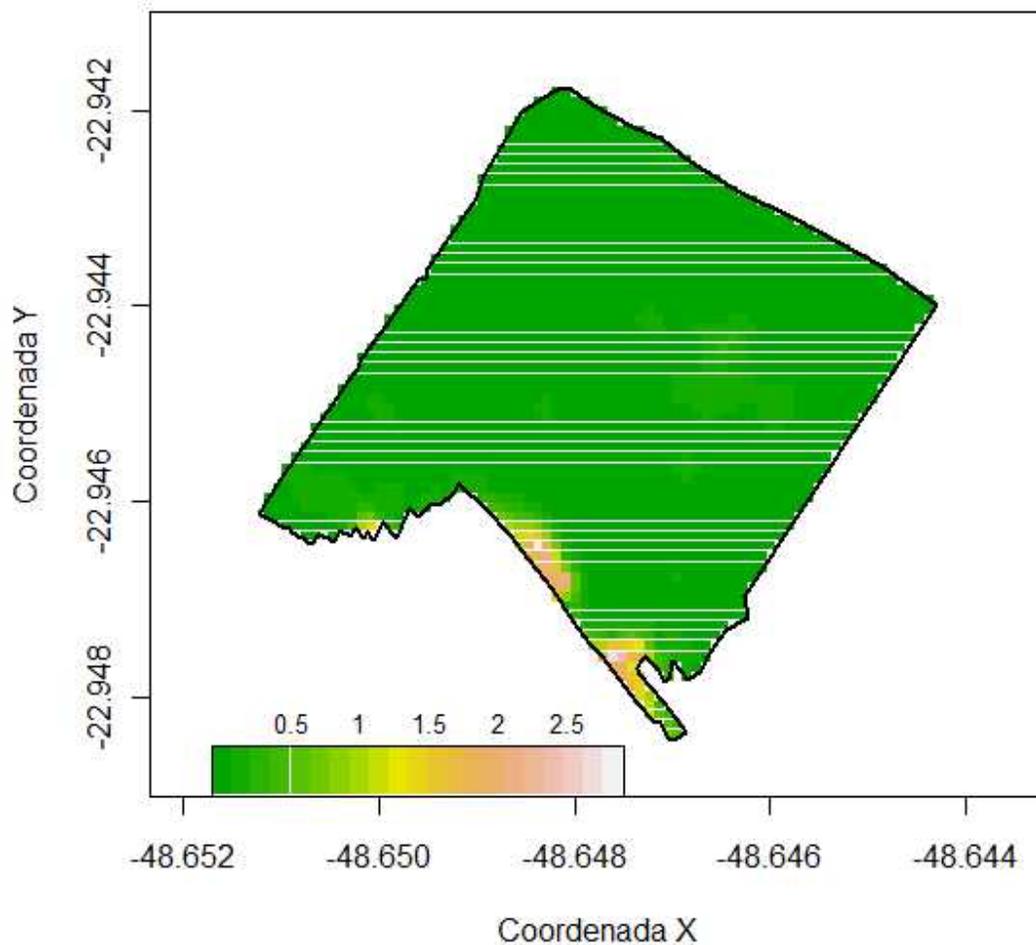


Figura 5: Mapa da variância de krigagem da variável CE do solo.

Com o objetivo de validar os mapas de predição por meio da construção de intervalos de confiança para cada ponto estimado realizou-se 1000 simulações condicionais, as quais consistem em simular vários mapas da distribuição da CE na área respeitando os parâmetros e modelos definidos anteriormente. Obtendo, desta forma, uma idéia da possí-

vel variabilidade do atributo em determinado ponto. Com essas simulações construiu-se o mapa de probabilidades, Figura 6.

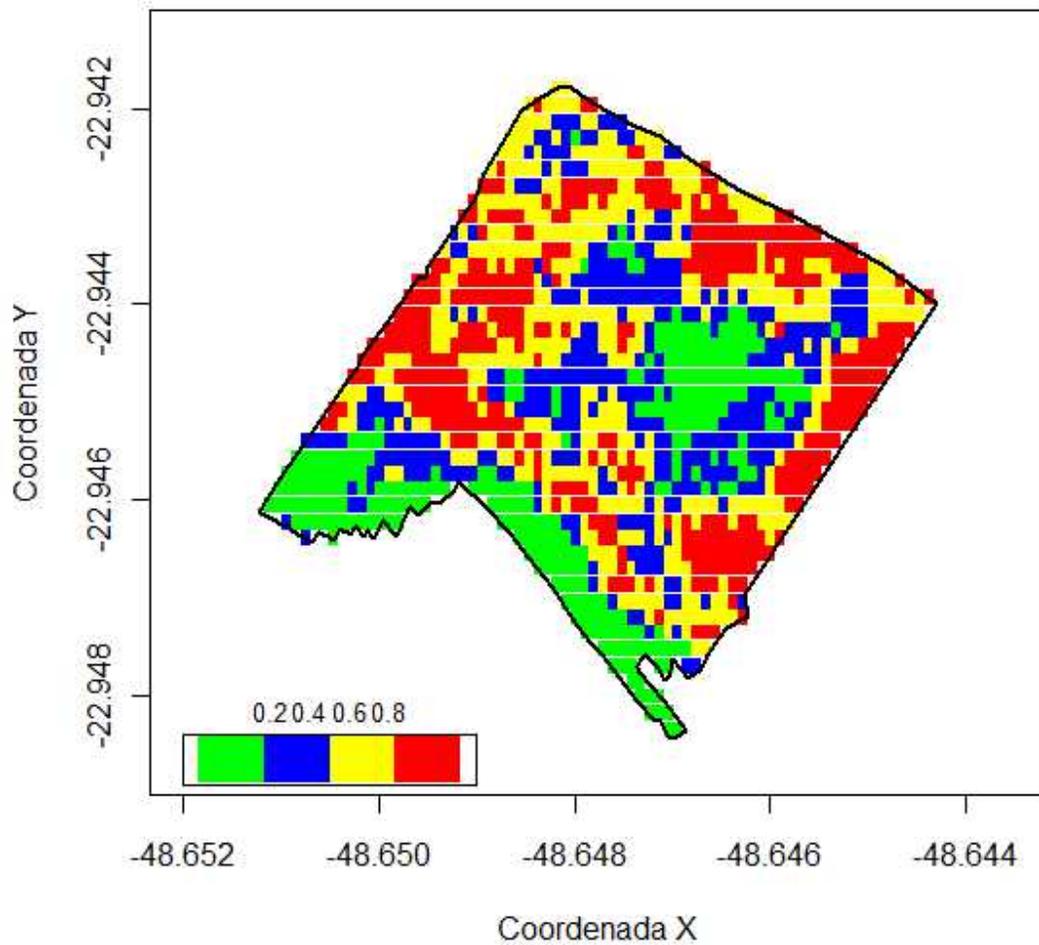


Figura 6: Mapa de probabilidades para a CE do solo.

O objetivo deste mapa é dividir a área em regiões mais ou menos prováveis de se encontrar valores abaixo ou acima de um determinado valor de corte. Para este estudo a

região de interesse (que deve ser "corrigida") foi aquela que apresenta valores de CE acima de 0.9. Isto é, observa-se na Figura 6 que a região em vermelho indica que a chance de ocorrência de um valor acima de 0.9 é igual ou superior a 80%.

4 Conclusão

A área monitorada apresentou condições diferenciadas com relação à condutividade elétrica lida de 0 a 0.30m, isto é, a distribuição dos valores de CE apresentou forte dependência espacial.

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se a análise considerando a metodologia de inferência Bayesiana para modelos de geoestatística.

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida.

5 Referências

BATCHELOR, B.; WHIGHAM, K.; DEWITT, J., *et al.* Precision agriculture: introduction to precision agriculture. Iowa Cooperative Extension, 1997. 4p.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. Estatística Básica. 4ª ed.. São Paulo: Atual, 1987. 321p.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. Model-based geostatistics. New York: Springer, 2007. 228p. .

EMBRAPA. Tecnologia em mecanização no Brasil: Equipamentos e sistemas para o futuro. In: SEMINÁRIO TEMÁTICO PARA PROSPECÇÃO DE DEMANDAS EM PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA NO BRASIL, Sete Lagoas-MG, 1997.

FARIAS, P. R. S.; BARBOSA, J. C.; VIERA, S. R.; SÁNCHEZ-VILA, X.; FER-
RAZ, L. C. C. B. Geostatistical analysis of the spacial distribution of *Rotylenchulus reni-*
formis on cotton cultivated in crop rotation. Russian Journal of nematology, Moscow, v10,
p. 1 – 9, 2002a.

GUIMARÃES, E. C. Geosestatística Básica e Aplicada. Uberlândia. Apostila Uni-
versidade Federal de Uberlândia, 2004. 76p.

MATHERON, G. The theory of rationalized variables and its applications. Lees
Cahiers du Centre de Moffologie mathématique. Fas. 5.C. G. Fontainebleau, 1971.

MOLIN, J. P. Jornal Agricultura de Precisão. Esalq/USP, Brasília (DF), Março de
2006.

R Development Core Team. R: a language and environment for statistical compu-
ting. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3 – 49000514 –
074 – 0, URL [http : //www.R – project.org/](http://www.R-project.org/).2011.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis.
R-NEWS, v.1, n.2, p.15 – 18, 2001.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. BIGGAR, J. W. Geostatistical
theory and application to variability of some agronomical properties. Hilgardia, Oakland,
v. 51, p.1 – 75, 1983.