

DOMINGOS SÁRVIO MAGALHÃES VALENTE

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA
DEFINIR ZONAS DE MANEJO EM CAFEICULTURA DE PRECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

DOMINGOS SÁRVIO MAGALHÃES VALENTE

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA
DEFINIR ZONAS DE MANEJO EM CAFEICULTURA DE PRECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 4 de março de 2010.

Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Coorientador)

Pesq. Antônio Alves Pereira

Prof. Carlos Antônio Oliveira Vieira

Prof. Mauri Martins Teixeira

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

“...a mente que se abre a uma nova ideia...

... jamais voltará ao seu tamanho original...”

Albert Einstein

Aos meus pais João Bosco Valente e Maria do Rosário Magalhães Valente, às minhas irmãs Flávia Valente e Fabiana Valente, à minha sobrinha Alice e à minha namorada Márcia Gabrielle, exemplos de amor, carinho, confiança, incentivo e dedicação irrestrita.

DEDICO.

A Deus, que ilumina todos os momentos de minha caminhada,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pelo grande apoio na minha caminhada acadêmica, pela confiança, amizade e participação irrestrita na execução desse trabalho, além dos valiosos ensinamentos.

Aos Professores Francisco de Assis Carvalho Pinto e Nerilson Terra Santos, pelas críticas construtivas, paciência e apoio na elaboração desse trabalho.

Aos Professores Tetuo Hara e Leda Rita D'Antonino Faroni, pelas contribuições e sugestões.

Ao meu amigo Zuzu e aos estudantes de pós-graduação Eduardo e Cleiton, pela valiosa contribuição em jornadas de trabalho para coleta de dados, sem a qual, não teria sido possível sua concretização.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela amizade e ajuda na realização desse trabalho.

Aos meus amigos Bruno Furtado e Igor Emmerich, pelo apoio constante com palavras confortáveis nos momentos difíceis.

Aos meus amigos e colegas da pós-graduação, pelo companheirismo, amizade, ideias e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), pelo espaço e apoio ao desenvolvimento desse trabalho.

BIOGRAFIA

Domingos Sárvio Magalhães Valente, filho de João Bosco Valente e Maria do Rosário Magalhães Valente, nasceu em Viçosa, Estado de Minas Gerais, em 13 de junho de 1978.

Em março de 1999, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, graduando-se em janeiro de 2004.

Durante o ano de 2004, trabalhou na ADM do Brasil LTDA na área de operações de armazéns, no Estado do Mato Grosso do Sul.

Em março de 2005, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de dissertação – requisito indispensável para obtenção do título de *Magister Scientiae* – em fevereiro de 2007.

Em março de 2007, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa de tese – requisito indispensável para obtenção do título de *Doctor Scientiae* –, em setembro de 2010.

Em julho de 2009, ingressou como professor Assistente da Universidade Federal Fluminense no Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, em Niterói, RJ.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Cafeicultura.....	4
2.2. Agricultura de precisão	6
2.3. Definição de zonas de manejo	8
2.4. Condutividade elétrica aparente do solo	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Algoritmo para interpolação pelo método de krigagem.....	11
3.2. Algoritmo para definição de zonas de manejo.....	17
3.2.1. Número de classes para as zonas de manejo	19
3.3. Medição da condutividade elétrica aparente do solo	20
3.4. Determinação da textura e propriedades químicas do solo.....	23
3.5. Georreferenciamento dos dados para elaboração dos mapas de variabilidade espacial.....	24
3.6. Avaliações das zonas de manejo obtidas utilizando o sistema desenvolvido	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Correlações entre condutividade elétrica aparente, altitude e propriedades do solo.....	29

4.2 Mapas interpolados pela metodologia de krigagem a partir de dados coletados em campo de produção de café de montanha	37
4.3 Zonas de manejo definidas com base em altitude e condutividade elétrica aparente do solo.	46
4.4 Avaliações da concordância entre as zonas de manejo e as propriedades do solo ...	56
5 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS	61
Apêndices	71
Apêndice A.....	72
Curva de Retenção de Água no Solo.....	72
Semivariogramas das propriedades do solo	73
Apêndice C.....	87
Validação cruzada dos mapas interpolados pela metodologia de krigagem	87
Apêndice D.....	101
Mapas das propriedades do solo classificadas em três classes.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados obtidos em campo.....	31
Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson entre as propriedades do solo, altitude local e condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m e 0,40 m de profundidade	35
Tabela 3. Modelos teóricos de semivariância ajustados para Altitude, CE20, CE40 e propriedades do solo para a Fazenda Braúna.....	40
Tabela 4. Média e desvio padrão da altitude para cada uma das classes para a ZMA....	48
Tabela 5. Média e desvio padrão da CE20 para cada uma das classes para a ZM20	49
Tabela 6. Média e desvio padrão da CE40 para cada uma das classes para a ZM40	50
Tabela 7. Média e desvio padrão da CE20 e altitude para cada uma das classes para a ZM20A.....	51
Tabela 8. Média e desvio padrão da CE40 e altitude para cada uma das classes para a ZM40A.....	52
Tabela 9. Média e desvio padrão da CE20, CE40 e altitude para cada uma das classes para a ZM2040A.....	53
Tabela 10. Coeficiente Kappa para as classificações das propriedades do solo com as zonas de manejo em três classes.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos: dois eletrodos de corrente (C1 e C2) e dois eletrodos potenciais (P1 e P2) (CORWIN; LESH, 2003).	9
Figura 2. Gráfico esquemático da função de semivariância e os parâmetros a serem ajustados.....	12
Figura 3. Esquema da matriz de interpolação com as células representando os pixels do mapa.	14
Figura 4. Mapa da Fazenda Braúna apresentando as áreas de produção de café e a área selecionada para a pesquisa.....	21
Figura 5. Medidor de condutividade elétrica aparente do solo modelo ERM-02.	22
Figura 6. Configuração da Matriz de Wenner com espaçamentos entre eletrodos de 0,20 m.....	22
Figura 7. Configuração da Matriz de Wenner com espaçamentos entre eletrodos de 0,40 m.....	22
Figura 8. Área selecionada para a pesquisa e localização dos pontos em que foram determinados a condutividade elétrica aparente do solo na Fazenda Braúna.	23
Figura 9. Janela principal do sistema de apoio à decisão desenvolvido.	38
Figura 10. Janela do sistema de apoio à decisão para ajuste dos semivariogramas.....	38
Figura 11. Janela do sistema de apoio à decisão para interpolação dos mapas pela metodologia de krigagem ordinária.	41
Figura 12. Mapas de variabilidade espacial da (a) condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m de profundidade, (b) condutividade elétrica aparente do solo a 0,40	

m de profundidade, (c) altitude, (d) umidade, (e) potássio, (f) fósforo, (g) zinco, (h) ferro, (i) manganês, (j) cobre, (k) pH, (l) cálcio, (m) magnésio, (n) alumínio, (o) acidez potencial, (p) soma de bases, (q) capacidade de troca de cátions efetiva, (r) capacidade de troca de cátions a pH 7, (s) saturação por bases, (t) saturação por alumínio, (u) matéria orgânica, (v) fósforo remanescente, (w) condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, (x) Areia grossa, (y) Areia fina, (z) Silte, (aa) Argila.	42
Figura 13. Janela do sistema de apoio à decisão para definição de zonas de manejo a partir dos mapas interpolados.	47
Figura 14. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir do mapa de variabilidade espacial da altitude (ZMA) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.	48
Figura 15. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir do mapa de variabilidade espacial da CE20 (ZM20) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.	49
Figura 16. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir do mapa de variabilidade espacial da CE40 (ZM40) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.	50
Figura 17. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas com o mapa de variabilidade espacial da CE20 e altitude (ZM20A) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.	51
Figura 18. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas com o mapa de variabilidade espacial da CE40 e altitude (ZM40A) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.	52
Figura 19. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas com o mapa de variabilidade espacial da altitude, CE20 e CE40 (ZM2040A) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.	53
Figura 20. Índice de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia da Classificação Normalizada (NCE) calculados para as zonas de manejo (a) ZMA, (b) ZM20, (c) ZM40, (d) ZM20A, (e) ZM40A e (f) ZM2040A.	56

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	- Resistividade, Ohm m;
a	- Espaçamento entre eletrodos, m;
ΔV	- Diferença de potencial, V;
i	- Corrente elétrica, A;
CE_a	- Condutividade elétrica aparente do solo, S m ⁻¹ ;
$\gamma(h)$	- Semivariância experimental;
$Z(x_i)$	- Valor da variável medida na posição x_i ;
N	- Número de pares de dados para a distância de separação (h);
i	- Posição da amostra;
h	- Distância que separa duas amostras;
C_0	- Efeito pepita;
$C_0 + C_I$	- Patamar;
A	- Alcance;
nx	- Número de pixel da matriz de interpolação na coordenada X;
INT	- Função que converte um número real em inteiro sem arredondamento;
X_{\max}	- Máxima coordenada X no conjunto de dados georreferenciados;
X_{\min}	- Mínima coordenada X no conjunto de dados georreferenciados;
ΔX	- Tamanho do pixel para a coordenada X;
ny	- Número de pixel da matriz de interpolação na coordenada Y;
Y_{\max}	- Máxima coordenada Y no conjunto de dados georreferenciados;

Y_{\min}	-	Mínima coordenada Y no conjunto de dados georreferenciados;
ΔY	-	Tamanho do pixel para a coordenada Y;
C_{ij}	-	Estimador da covariância entre os valores observados nos pontos amostrados i e j ;
C_{i0}	-	Estimador da covariância entre um ponto amostrado em campo e o ponto a ser estimado;
w_i	-	Pesos de cada ponto amostrado ao ponto não amostrado;
μ	-	Multiplicador de Lagrange;
u_{ij}	-	Elemento (i,j) da matriz de pertinência;
V_i	-	Centróides das classes;
d_{ij}	-	Distância entre o i-ésimo centro da classe e o j-ésimo ponto da amostra;
q	-	Fator de nebulosidade;
Ka	-	Estimativa do coeficiente Kappa;
x_{ii}	-	Elemento da matriz de confusão na linha i e coluna i ;
$x_{i\oplus}$	-	Somatório dos elementos da linha i da matriz de confusão;
$x_{\oplus i}$	-	Somatório dos elementos da coluna i da matriz de confusão;
c	-	Número total de classes;
n	-	Número total de amostras.
Z_{cal}	-	Estatística Z padronizada e distribuída normalmente; e
$\hat{\sigma}^2$	-	Variância do coeficiente Kappa.

RESUMO

VALENTE, Domingos Sárvio Magalhães, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2010. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Nerilson Terra Santos.

A aplicação de fertilizantes e corretivos às taxas variáveis, baseada nas propriedades físicas e químicas do solo, exige uma amostragem densa para se determinar a variabilidade espacial no campo. Uma das técnicas para reduzir o número de amostras é definir zonas de manejo. Alguns pesquisadores têm demonstrado a importância desempenhada pelas variáveis elétricas do solo para explicar a variabilidade de suas propriedades. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema de apoio à decisão, para definir zonas de manejo com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo em regiões de produção de cafés de montanha. O sistema de apoio à decisão foi estruturado com formulários específicos para ajustes dos semivariogramas, interpolação dos mapas por krigagem e delimitação das zonas de manejo, utilizando-se o algoritmo *fuzzy k-means*. Para encontrar o número ótimo de classes, determinou-se o valor de dois índices: o Índice de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia da Partição Modificada (MPE). A condutividade elétrica aparente do solo foi determinada a 0,20 m (CE20) e 0,40 m (CE40) de profundidade, utilizando-se o medidor portátil ERM-02. Foram criadas seis zonas de manejo definidas a partir do mapa de altitude (ZMA), do mapa de CE20 (ZM20), do mapa de CE40 (ZM40), dos mapas de CE20 e altitude (ZM20A), dos mapas

de CE40 e altitude (ZM40A) e dos mapas de altitude, CE20 e CE40 (ZM2040A). Para cada caso, a área foi classificada em duas, três, quatro e cinco classes. Para análise da concordância entre as zonas de manejo e as propriedades do solo, calculou-se o coeficiente Kappa. Os valores médios obtidos para CE20 e CE40 foram de $1,80 \text{ mS m}^{-1}$ e $1,22 \text{ mS m}^{-1}$, respectivamente. A CE20 e CE40 apresentaram baixa correlação com as propriedades do solo. A correlação mais elevada foi obtida para o fósforo remanescente com valores de 0,427 e 0,465 para a CE20 e CE40, respectivamente. Os mapas de CE20 e CE40 apresentam forte semelhança entre si, com um coeficiente de correlação de 0,969. O mapa de potássio foi o que melhor se correlacionou com o mapa de CE20. Pelos valores obtidos de FPI e MPE, foi observado que a ZMA exige uma análise adicional para se determinar o número ótimo de classes. Para a ZM20 e ZM40, o número ótimo de classes foi de duas. Para a ZM20A, ZM40A e ZM2040A, o número ótimo de classes foi de três. O coeficiente Kappa para ZMA foi significativamente superior na classificação do zinco, saturação por bases, pH, matéria orgânica, acidez potencial e areia fina, em relação às demais zonas de manejo. Para as demais propriedades do solo, os valores mais elevados de coeficiente Kappa foram obtidos utilizando-se a ZM20A e ZM40A. Pela análise dos coeficientes Kappa, concluiu-se que ZM20A, ZM40A e ZM2040A apresentaram melhores resultados na classificação das propriedades do solo. Entretanto, a ZM2040A não apresentou melhores resultados que a ZM20A e ZM40A.

ABSTRACT

VALENTE, Domingos Sárvio Magalhães, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2010. **Development of a decision support system for defining management zones for precision coffee production.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisors: Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Nerilson Terra Santos.

The variable rate application of fertilizers and lime based on chemical and physical properties of soil requires a dense sampling for determining the spatial variability in the field. One technique to reduce the number of samples is defining the management zones. Some researchers have demonstrated the importance played by the soil electrical variables to explain the variability of soil properties. Thus, the objective of this study is to develop and to evaluate a decision support system for defining management zones based on soil apparent electrical conductivity in the mountain coffee production fields. The decision support system was structured to perform semivariograms, to generate maps by kriging and to define management zones using *fuzzy k-means* algorithm. To find the optimal number of classes, two indices were calculated: the Fuzzy Performance Index (FPI) and Modified Partition Entropy (MPE). The electrical conductivity of soil was determined at 0.20 m (CE20) and 0.40 m (CE40) using a portable meter ERM-02 made by *Landviser*. The data were grouped into six management zones defined from the map of elevation (ZMA), the map of CE20 (ZM20), the map of CE40 (ZM40), the maps of CE20 and elevation (ZM20A), the maps of CE40 and elevation (ZM40A) and the maps of altitude, CE20 and CE40 (ZM2040A). For each case, the field was classified in two, three, four and five classes. To analyze the

correlation between the management zones and soil properties, the Kappa coefficient was calculated. The mean values of CE20 and CE40 were 1.80 mS m^{-1} and 1.22 mS m^{-1} , respectively. The CE20 and CE40 showed low correlation with soil properties. The highest correlation was obtained for the remaining Phosphorus with values of 0.427 and 0.465 for CE20 e CE40, respectively. Maps of CE20 and CE40 presented high similarity to each other, with a correlation coefficient of 0.969. The map of Potassium content was more closely correlated with the map of CE20. For values obtained of FPI and MPE, it was observed that the ZMA requires additional analysis to determine the optimal number of classes. For ZM20 and ZM40, the optimal number of classes was two. For ZM20A and ZM40A, the optimal number of classes was three. The Kappa coefficient for ZMA was better when classifying zinc, base saturation, pH, organic matter, potential acidity and fine sand, in relation to other management zones. For the other soil properties, the highest values of Kappa coefficient were obtained using the ZM20A and ZM40A, and they were statistically equal. By analyzing the Kappa coefficient, it was concluded that ZM20A, ZM40A and ZM2040A were the best way to classify soil properties. However, ZM2040A was not better than ZM20A and ZM40A.

1. INTRODUÇÃO

A atividade cafeeira, em um mercado globalizado – com clientes cada vez mais exigentes com relação à qualidade e a menores preços –, tem se transformado em um ramo especializado, em que se devem minimizar os custos e obter produtos diferenciados, de forma a agregar o máximo de valor possível no produto final. Dessa forma, o cultivo de café, utilizando-se técnicas de agricultura de precisão, pode trazer inúmeros benefícios, dentre os quais está a identificação de áreas com maior potencial produtivo e qualitativo.

Na agricultura de precisão, a aplicação de práticas agronômicas, tais como: adubação, controle de plantas daninhas, controle de pragas e doenças, é feita de forma espacialmente variável em função de informações coletadas no campo (ORTEGA; SANTIBÁÑEZ, 2007). Com isso, há uma otimização do uso de insumos agrícolas com redução dos riscos econômicos e ambientais, obtendo-se maior rentabilidade e qualidade dos produtos (CORWIN; LESCH, 2003; WHELAN; MCBRATNEY, 2001). No entanto, a grande dificuldade da agricultura de precisão está em determinar como as dosagens dos insumos agrícolas devem ser variadas no espaço e no tempo para se obter tais benefícios (ANSELIN *et al.*, 2004; BOOLTINK *et al.*, 2001).

A aplicação da agricultura de precisão com base em propriedades físicas e químicas do solo exige uma amostragem densa para determinação da variabilidade espacial no campo, seguida da elaboração dos mapas de fertilidade e da aplicação às taxas variáveis dos insumos agrícolas. Um sistema de amostragem com alta densidade de pontos representa, muitas vezes, um longo tempo despendido para aquisição das amostras, além de alto custo de análises laboratoriais. Porém, a diminuição da densidade

de amostragem pode levar a erros na estimativa da variabilidade espacial dos nutrientes do solo, o que poderá ocasionar erros de recomendação. Em um sistema de amostragem ótimo, em qualquer estudo, deve proporcionar uma estimativa com menor custo de amostragem sem, no entanto, deixar de representar a variabilidade existente no campo de produção (YAN *et al.*, 2007a).

Uma das técnicas para reduzir o número de amostras para análise de solo é definir zonas de manejo. A zona de manejo é uma área que apresenta características semelhantes entre os fatores que limitam a produtividade e/ou qualidade do produto, podendo, por isso, ser tratada com a mesma dosagem de insumo a ser aplicado. Além disso, quando se refere à cafeicultura de montanha, a definição de zonas de manejo é importante, pois facilita a aplicação de fertilizantes às taxas variáveis, uma vez que, nessas regiões, existe a impossibilidade de transito de máquinas agrícolas.

As informações de campo mais utilizadas para definir zonas de manejo baseiam-se no modelo digital de elevação, em mapas de fertilidade do solo obtidos por amostragem sistemática no campo, em mapa de condutividade elétrica aparente do solo, em mapa de matéria orgânica do solo estimada por sensoriamento remoto e em mapas de produtividade, obtidos para mais de uma safra (FLEMING *et al.*, 2004). Para definir zonas de manejo, pode-se utilizar técnicas de análises de agrupamento de dados. As técnicas de análise de grupamento são baseadas em algoritmos de classificação não-supervisionada, tendo como objetivo dividir um conjunto de dados em classes. Os algoritmos mais utilizados para definição de zonas de manejo são os de agrupamento por partição, sendo que, os mais comuns são *k-means*, ISODATA e *fuzzy k-means*.

Alguns pesquisadores (CORWIN; LESCH, 2003; CORWIN *et al.*, 2003b; CORWIN; LESCH, 2005a; YAN *et al.*, 2007a; YAN *et al.*, 2007b; YAN *et al.*, 2008; SAEY *et al.*, 2009) têm demonstrado a importância desempenhada pelas variáveis elétricas do solo para explicar a variabilidade das suas propriedades físico-químicas e da produtividade agrícola. A condutividade elétrica aparente do solo tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas em medições de caracterização da variabilidade espacial do campo, devido a sua facilidade de medição e confiabilidade (CORWIN; LESCH, 2003). Em se tratando de cafeicultura de montanha, não foram encontrados trabalhos que relacionam a condutividade elétrica aparente e as propriedades do solo, dentre elas, a estrutura, textura e composição química. Em regiões de produção de cafés de montanha, existe a necessidade de utilizar sensores portáteis para coleta de informações no campo, uma vez que o tráfego de máquinas é limitado nessas áreas.

O grande número de variáveis que envolvem todo o processo de agricultura de precisão aliado às variações temporais e espaciais no campo e aos múltiplos objetivos a serem atingidos, torna o processo de tomada de decisão complexo. Segundo McBratney *et al.* (2005), a falta de desenvolvimento adequado de um sistema de apoio à decisão tem dificultado o uso da agricultura de precisão, justamente devido ao grande número de dados adquiridos e à pouca estrutura para o processamento das informações. Na cafeicultura de precisão, as pesquisas mais recentes têm focado a definição de zonas de manejo. No entanto, na literatura pesquisada, não se encontrou trabalhos sobre sistemas de apoio à decisão e estratégias bem concebidas que flexibilizassem a incorporação dos conceitos e práticas para definir zonas de manejo, utilizando-se condutividade elétrica aparente do solo em cafeicultura de montanha.

Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de apoio à decisão, para definir zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes, com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo. Especificamente, objetivou-se:

- Desenvolver um algoritmo utilizando a metodologia de krigagem para elaboração de mapas interpolados a partir de dados coletados em campo;
- Implementar um algoritmo *fuzzy k-means* para definição de zonas de manejo com base nos mapas interpolados;
- Realizar análises de correlação entre os dados de condutividade elétrica aparente e propriedades texturais e químicas do solo em áreas de produção de café de montanha;
- Definir o número ideal de classes para as zonas de manejo definidas; e
- Avaliar a qualidade das zonas de manejo definidas com diferentes variáveis de entrada para classificar as propriedades do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cafeicultura

Conforme dados da CONAB (2009), o Brasil apresenta uma área cultivada de 2.315.521 hectares de café. A estimativa para safra 2009/2010 é da ordem de 45,89 a 48,66 milhões de sacas, de 60 quilos, de café beneficiado. A produção de café arábica representa 74,2% do total da produção, sendo o Estado de Minas Gerais o maior produtor, com 50% da produção nacional. O café robusta/conilon tem uma participação de 25,8% da produção nacional, sendo que o Estado do Espírito Santo é o maior produtor de robusta, com uma participação de 71,7% da produção. O Brasil é o maior produtor e exportador de café e o segundo maior consumidor de café do mundo.

O café é um produto cujo valor é baseado na qualidade de bebida, sendo, portanto, um dos resultados que o produtor busca em sua lavoura. A qualidade é obtida em função de vários fatores, tais como: clima, relevo, fertilidade do solo, insolação, manejo da lavoura, cultivar, espaçamento e maturação. Um manejo localizado na cafeicultura, utilizando-se técnicas de agricultura de precisão, pode trazer grandes benefícios na identificação do grau de relacionamento dos fatores com a qualidade do café (ALVES, 2005).

O cafeeiro apresenta alta exigência com relação ao potássio, sendo que o cloreto de potássio é a fonte mais utilizada. Com um percentual de 47% de cloro, este fertilizante leva a planta do café a absorver e acumular altas concentrações desse elemento. O potássio tem sido considerado como o “elemento da qualidade” em nutrição de plantas (MALAVOLTA, 1980). No entanto, segundo Amorim *et al.* (1973)

apud Silva *et al.* (1999), a adubação NPK, sendo K na forma de cloreto, apresenta um efeito negativo na qualidade de bebida do café. Admite-se que o cloro absorvido e acumulado nas plantas de café apresente efeitos diretos e indiretos na qualidade de bebida (SILVA *et al.*, 1999).

A qualidade da bebida do café está relacionada com características físico-químicas presentes no fruto. Os constituintes químicos são os responsáveis pelo sabor e aroma. Entre os compostos, podem-se destacar os açúcares, os ácidos, as enzimas, os compostos fenólicos, a cafeína, os compostos voláteis, os ácidos graxos, que, de acordo com as concentrações, conferem a qualidade final de bebida do café (SILVA *et al.*, 1999).

Os compostos químicos dependem de fatores genéticos, ambientais, condições de manejo e processamento pós-colheita. Com relação às condições de manejo, pode-se destacar a adubação e nutrição das plantas, que podem influenciar na composição orgânica dos frutos de café – o que será refletido na qualidade de bebida. São vários os processos bioquímicos que ocorrem nos frutos do café e que influenciam a qualidade da bebida. Essas transformações são, principalmente, de natureza enzimática, tais como: glicosidases, polifenoloxidasas, lípases e proteases. Carvalho *et al.* (1994) verificaram que a atividade de polifenoloxidase e índice de coloração aumentaram com a qualidade da bebida do café, enquanto que o índice de acidez total decresceu.

Silva *et al.* (1999), em um estudo sobre as fontes e doses de potássio na produção e qualidade do café na Região de Minas Gerais, verificaram, em duas safras consecutivas, que as fontes e doses de K não alteraram significativamente a produção de café. No entanto, houve efeito significativo, ao nível de 1% de significância, entre os valores de atividade da polifenoloxidase – que confere a maior qualidade do café –, sendo que os maiores valores obtidos foram para o K_2SO_4 , seguido do $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ e do KCl. Para a acidez titulável total, houve diferenças significativas, entre as fontes de K. O menor valor de acidez titulável é indicativo de melhor qualidade. Os valores mais baixos de acidez titulável total foram encontradas para K_2SO_4 e KCl. Para o índice de coloração houve diferenças significativas apenas para uma safra, e o maior valor do índice de coloração foi obtido utilizando-se o K_2SO_4 e $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$. O maior índice de coloração é indicativo de café de melhor qualidade. Para os açúcares redutores, houve diferenças significativas para as fontes de K, apenas para uma safra. Para os açúcares não-redutores e totais, houve diferenças significativas, ao nível de significância de 1%, para as fontes e dosagem, em ambas as safras.

Silva *et al.* (2002a) e Silva *et al.* (2002b) estudaram a qualidade da bebida do café produzido sob efeito da adubação potássica em diferentes condições edafoclimáticas, e verificaram um efeito significativo da interação local de cultivo, fontes e doses de K. Dessa forma, os autores sugerem um comportamento diferenciado das fontes e doses de K aplicadas em locais diferentes com relação à obtenção de um café de qualidade de bebida superior.

Segundo Carvalho *et al.* (1994), a fonte de potássio que promove a melhoria da qualidade de bebida do café é o sulfato de potássio. Essa fonte de potássio apresentou um comportamento quadrático, com uma dosagem ótima a ser definida para obtenção do máximo de atividade da polifenoloxidase. Como a dosagem ótima depende dos fatores do teor de potássio presentes no solo – aliado a variabilidade espacial do mesmo –, principalmente em regiões de produção de cafés de montanha, torna-se interessante à aplicação de fertilizantes à taxa variável, para obtenção de cafés de melhores qualidades.

2.2. Agricultura de precisão

A agricultura de precisão é uma forma de manejo que aumenta o número de decisões por unidade de área por unidade de tempo com benefícios associados. Esta definição mais genérica não implica em utilização de uma determinada tecnologia ou conjunto de tecnologias, pois as decisões podem ser feitas com base em sensores eletrônicos ou pelo próprio homem (MCBRATNEY *et al.*, 2005).

Para se adotar a agricultura de precisão pode-se utilizar de várias ferramentas, tais como: GPS, sensores, sistemas hidráulicos e programas computacionais. No entanto, para se aplicar as técnicas de cafeicultura de precisão e gerar resultados satisfatórios na obtenção de café de melhor qualidade de bebida, deve-se identificar o grau de relacionamento dos diferentes fatores que influenciam a qualidade, bem como a consistência na sua variabilidade espacial (QUEIROZ *et al.*, 2004).

A identificação dos fatores que influenciam a qualidade pode ser útil para definição de zonas de manejo. A segregação – em zonas de manejo – dos cafés dentro da lavoura pode trazer benefícios, tais como: obtenção de produtos de melhores qualidades, por meio do tratamento diferenciado no manejo, com o direcionamento de recursos, podendo-se maximizar o potencial produtivo e qualitativo (QUEIROZ *et al.*, 2004).

Pinto *et al.* (2006), em um estudo sobre a influência da face de exposição ao sol na qualidade de bebida do café na Fazenda Braúna, em Araponga, Minas Gerais, verificaram que os cafeeiros com maior exposição ao sol apresentaram, significativamente, qualidade de bebida superior em relação àqueles menos expostos ao solo. Dessa forma, o conhecimento das incidências de radiação solar poderia auxiliar na identificação de locais com maiores potenciais qualitativos, além de propiciar novas técnicas de manejo.

Alves (2009), em um estudo da variabilidade espacial e temporal da qualidade da bebida do café cereja, produzido em regiões de montanha, comparou o mapa de variabilidade espacial de brix com o de qualidade de bebida do café. Observou que os talhões que obtiveram notas de qualidade de bebida superior a 80 (oitenta) pontos (BSCA) apresentaram níveis de graus brix superior aos frutos de café cereja com nota inferior a 80 (oitenta) pontos (BSCA). Os valores de grau brix e as notas de qualidade de bebida determinados foram diferentes do início ao fim da safra, sendo que os frutos colhidos no final da safra tiveram qualidade superior. O autor sugeriu a utilização do refratômetro portátil para leitura do grau brix como ferramenta para acompanhamento do desenvolvimento, maturação dos frutos de café e para estabelecimento de zonas de manejo.

A altitude é um atributo importante no zoneamento para produção de cafés de qualidade. A altitude influi direta ou indiretamente sobre a temperatura, umidade relativa do ar e regime de chuvas. Além disso, em condições favoráveis, os micro-organismos se desenvolvem, produzindo enzimas que reagem com os componentes químicos dos frutos do café, principalmente os açúcares. Dessa forma, ocorrem fermentações, o que produz cafés com piores qualidades de bebida (CHALFOUN; CARVALHO, 2001).

Alves *et al.* (2007), em um estudo sobre delimitação de territórios de potencial para a produção de cafés de qualidade de bebida na região sul de Minas Gerais, verificaram que as regiões que apresentaram características favoráveis para produção de café com qualidade de bebida superior estavam nas altitudes entre 900 a 1.200 metros.

Silva *et al.* (2008), em um estudo sobre a variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras, concluíram que a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo justifica a aplicação às taxas variáveis de fertilizantes na lavoura cafeeira. Além disso, verificaram que o

comportamento da variabilidade espacial dos atributos químicos e da produtividade permaneceram semelhantes nos dois anos de safra.

Oliveira *et al.* (2006), em um estudo sobre a variabilidade espacial de variáveis indicadoras de fertilidade do solo sob cultivo de café conilon, verificaram que os indicadores apresentaram alta variabilidade na área estudada para as diferentes variáveis. Dessa forma, uma amostragem agronômica convencional falharia na identificação da variabilidade espacial das propriedades do solo, levando a incorrer erros nas recomendações de calcário e fertilizante.

Para obtenção de café com melhores qualidades de bebida, deve-se fazer uso de fertilizantes e corretivos em dosagens adequadas. Assim, utilizando-se técnicas de agricultura de precisão, pode-se recomendar o uso de corretivos e fertilizantes às taxas variáveis, obtendo produtos de melhores qualidades, além de reduzir custos e aumentar a produtividade (CORRÊA *et al.*, 2001; DIAS, 2007).

2.3. Definição de zonas de manejo

Rodrigues (2008) definiu zonas de manejo com base em determinações realizadas com sensor de clorofila em regiões de produção de cafés. Para isso, utilizou os métodos de classificação não-supervisionada *k-means* e *fuzzy k-means*. Analisou a concordância entre as zonas de manejo definidas por medidor de clorofila SPAD e concentrações de nutrientes foliares, que obtiveram acertos entre 18 a 39% para o *k-means* e 18 a 38% para *fuzzy k-means*.

Molin e Castro (2008) definiram zonas de manejo com base em condutividade elétrica aparente do solo utilizando o método *fuzzy k-means*. Os autores utilizaram a distância euclidiana e coeficiente fuzzy igual a 1,2. Para determinar o número ótimo de zonas de manejo utilizaram os índice de performance fuzzy (FPI) e entropia da partição modificada (MPE). Os autores concluíram que o método resolveu com sucesso o delineamento das zonas de manejo.

Morari *et al.* (2009) utilizaram o método *fuzzy k-means* para definir zonas de manejo baseada em condutividade elétrica aparente do solo para vinicultura de precisão. Para definir o número ótimo de classes, os autores utilizaram o índice de performance fuzzy (FPI) e a entropia da classificação normalizada (NCE). Os autores concluíram que a definição de zonas de manejo é altamente desejável em vinicultura de precisão. Relataram que a combinação entre mapas interpolados pela técnica de geoestatística e

classificação pelo método *fuzzy k-means* é uma forma eficaz para delinear zonas de manejo de forma automática.

Pedroso *et al.* (2010) realizaram um estudo comparativo entre um algoritmo de segmentação e o algoritmo *k-means*. Destacaram que, efetivamente, não há dúvidas que os algoritmos *k-means* e *fuzzy k-means* expliquem a variância para uma ou mais variáveis. No entanto, apresentam algumas limitações como, por exemplo, a de que não há restrições no algoritmo para gerar sempre classes contínuas, além de apresentar uma carência de um real indicador para se determinar o número ideal de classes, muitas vezes, necessitando de análises adicionais e intervenção de um especialista. Por fim, necessitam de uma grade regular em análises multivariadas.

2.4. Condutividade elétrica aparente do solo

A condutividade elétrica aparente do solo pode ser obtida por vários métodos. Dentre eles destaca-se o método da resistividade elétrica. Esse método é baseado na introdução de quatro eletrodos igualmente espaçados na superfície do solo. Uma corrente elétrica é aplicada entre os eletrodos externos e a diferença de potencial é medida nos eletrodos internos, conforme apresentado na Figura 1. Essa configuração é denominada *Matriz de Wenner*. O método foi desenvolvido por volta de 1920 por Conrad Schlumberger, na França, e Frank Wenner, nos Estados Unidos, para avaliação da condutividade elétrica aparente do solo (CORWIN; HEDRICKX, 2002; CORWIN; LESH, 2003).

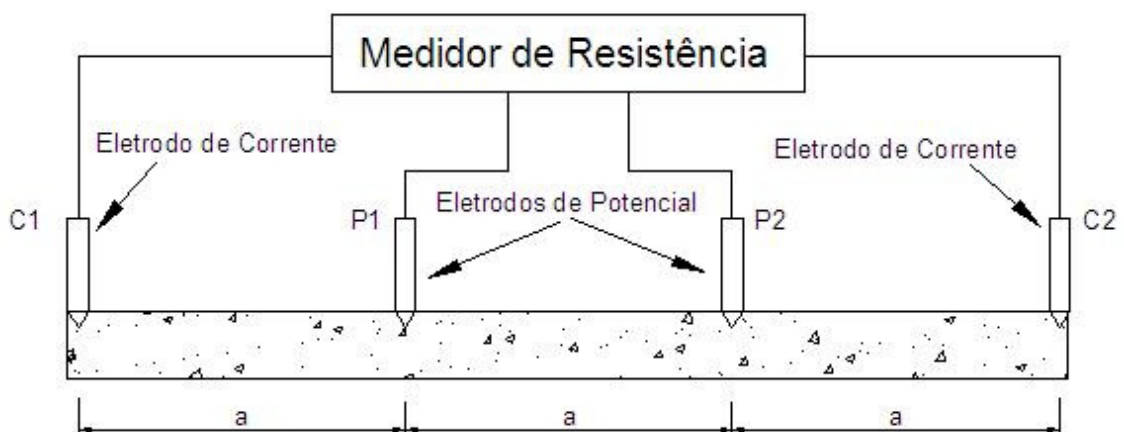


Figura 1. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos: dois eletrodos de corrente (C1 e C2) e dois eletrodos potenciais (P1 e P2) (CORWIN; LESH, 2003).

Segundo Avants *et al.* (1999), a resistividade na *Matriz de Wenner* pode ser determinada pela Equação 1.

$$\rho = \frac{2.\pi.a.\Delta V}{i} \quad (1)$$

Em que,

- ρ - Resistividade, Ohm m;
- a - Espaçamento entre eletrodos, m;
- ΔV - Diferença de potencial, V; e
- i - Corrente elétrica, A.

A condutividade elétrica aparente do solo é o inverso da resistividade, que pode ser determinada pela Equação 2.

$$CE_a = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

em que,

- CE_a = Condutividade elétrica aparente do solo, S m⁻¹.

A corrente elétrica pode fluir no solo de três formas: (a) na fase líquida, através dos sólidos dissolvidos na água contida nos grandes poros do solo; (b) na fase sólido-líquido, através de cátions trocáveis associados com minerais de argila; e (c) na fase sólida, através de partículas sólidas que estão em contato umas com as outras. Devido a essas três fases, a condutividade elétrica pode ser influenciada por várias propriedades físicas e químicas do solo, tais como: salinidade, grau de saturação, umidade e densidade. Além disso, principalmente através dos cátions trocáveis, a condutividade elétrica é influenciada pelo teor e tipo da argila, capacidade de troca de cátions e matéria orgânica. As primeiras medições da condutividade elétrica foram utilizadas para identificação de solos salinos. Atualmente, o mapeamento da condutividade elétrica aparente tem sido utilizado para definir zonas de manejo, devido ao baixo custo e agilidade de medição (CORWIN; LESH, 2005a).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de apoio à decisão foi desenvolvido na linguagem de programação *Visual Basic*, versão 6.0, aplicável ao ambiente *Windows*. Esse sistema foi estruturado com formulários específicos para ajustes dos semivariogramas, interpolação dos mapas por krigagem e desenvolvimento das zonas de manejo, utilizando-se o algoritmo *fuzzy k-means*.

3.1. Algoritmo para interpolação pelo método de krigagem

Para implementação da metodologia de krigagem, primeiramente foi gerado o semivariograma experimental. Para isso, utilizou-se a Equação 3, definida segundo Isaaks e Srivastava (1989) por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (3)$$

Em que:

- $\gamma(h)$ - Semivariância experimental;
- $Z(x_i)$ - Valor da variável medida na posição x_i ;
- $Z(x_{i+h})$ - Valor da variável medida na posição $x_{(i+h)}$;
- N - Número de pares de dados para a distância de separação (h);
- i - Posição da amostra; e
- h - Distância que separa duas amostras.

A semivariância experimental foi calculada considerando-se a dependência espacial como isotrópica, ou seja, a dependência espacial era a mesma para qualquer direção.

Os dados amostrados em campo não apresentam valores fixos de distância de separação. Dessa forma, definiu-se, para cada amostra, uma distância de separação (h), se pertencer ao intervalo, $(h - \Delta h \leq di < h + \Delta h)$, em que, di é a distância real de separação entre as amostras no campo. O valor de Δh é determinado, dividindo-se a distância máxima entre amostras e o número de intervalos de distância inserido pelo usuário. A distância máxima poderá ser definida pelo usuário para o cálculo de Δh , no entanto, somente será utilizada se for menor que a distância real máxima observada entre as amostras de campo.

No sistema foi implementado quatro funções teóricas (Equação 4, 5, 6 e 7) para ajuste à semivariância experimental. Na Figura 2 é apresentada, de forma esquemática, a função de semivariância teórica e os parâmetros que foram ajustados.

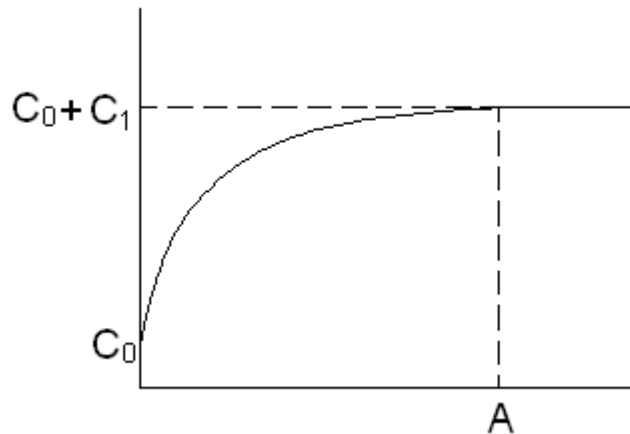


Figura 2. Gráfico esquemático da função de semivariância e os parâmetros a serem ajustados.

a) Linear com patamar

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C_1}{A} h & \text{se } h \leq A \\ C_0 + C_1 & \text{se } h > A \end{cases} \quad (4)$$

Em que:

- C_0 - Efeito pepita;
- $C_0 + C_1$ - Patamar; e
- A - Alcance.

b) Esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{A} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] & \text{se } h \leq A \\ C_0 + C_1 & \text{se } h > A \end{cases} \quad (5)$$

c) Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{h}{A} \right)^2 \right) \right] \quad (6)$$

d) Exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{A} \right) \right] \quad (7)$$

Para verificar o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, calculou-se o valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o coeficiente de determinação (R^2) dos dados de semivariância experimental, em relação aos valores de semivariância estimado pelo modelo. Para análise da dependência espacial, foi calculado o índice de dependência espacial definido por $C_1/(C_0+C_1)$.

O ajuste da função ao semivariograma experimental foi obtido por regressão não-linear. Para isso, implementou-se o método iterativo de Levenberg-Marquardt, que consiste em uma modificação do método de Gauss Newton para ajustes de funções não-lineares (LOURAKIS, 2005). O método de Levenberg-Marquardt foi implementado, pois contorna o problema da resolução da matriz Hessiana – caso essa não tenha inversa.

O método de Levenberg-Marquardt necessita que se estabeleçam valores iniciais para os parâmetros de ajuste. No presente trabalho, foi considerado como valor inicial para o efeito pepita (C_0), a mínima semivariância experimental calculada. Para o valor da semivariância (C_1), o valor máximo da semivariância experimental calculado, menos o efeito pepita (C_0). Para o alcance (A), a máxima distância de separação entre pares de pontos.

Para o desenvolvimento do mapa interpolado pelo método de krigagem, foi criada uma matriz de interpolação. O esquema dessa matriz está apresentado na Figura 3. Cada célula da matriz representa um pixel do mapa. O pixel é a menor fração de uma imagem digital. O tamanho de cada pixel, o número máximo e mínimo de pontos amostrais vizinhos ao ponto estimado e o raio máximo do círculo de busca de pontos amostrais vizinhos, é definido pelo usuário. No presente trabalho, foi utilizado um tamanho de pixel de cinco metros, número mínimo e máximo de vizinhos, respectivamente, igual a um e dezesseis, com raio de busca menor ou igual à distância máxima do semivariograma.

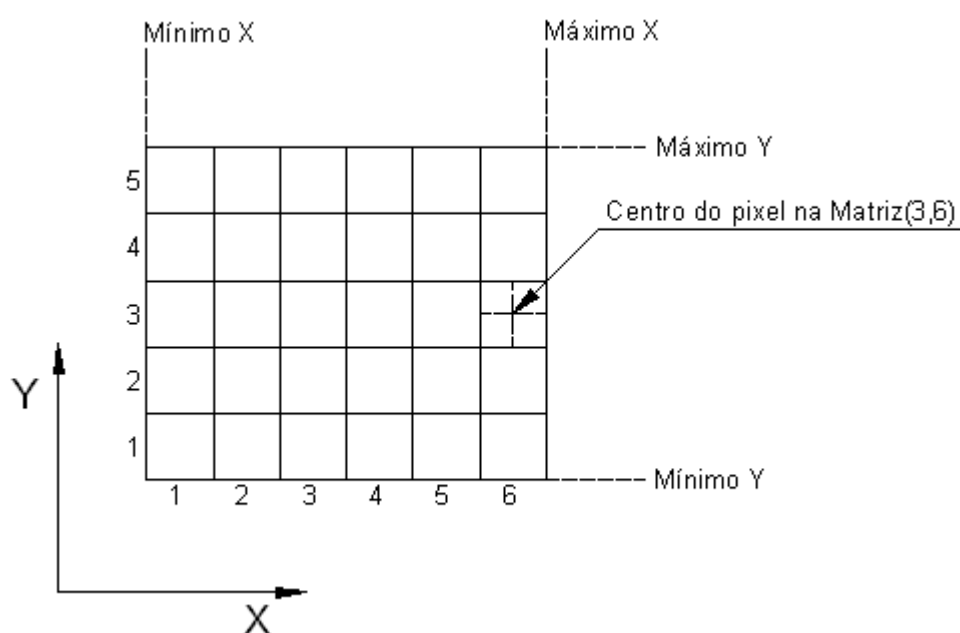


Figura 3. Esquema da matriz de interpolação com as células representando os pixels do mapa.

Para cálculo do número de linhas e colunas na matriz de interpolação utilizou-se as coordenadas máxima e mínima, em X e Y, dos dados georreferenciados em campo, conforme Equações 8 e 9.

$$nx = INT \left[\frac{(X_{\max} - X_{\min})}{\Delta X} + 1 \right] \quad (8)$$

Em que:

- nx - Número de pixel da matriz de interpolação na coordenada X;
- INT - Função que converte um número real em inteiro sem arredondamento;

- X_{\max} - Máxima coordenada X no conjunto de dados georreferenciados;
- X_{\min} - Mínima coordenada X no conjunto de dados georreferenciados; e
- ΔX - Tamanho do pixel para a coordenada X.

$$n_y = INT \left[\frac{(Y_{\max} - Y_{\min})}{\Delta Y} + 1 \right] \quad (9)$$

Em que:

- n_y - Número de pixel da matriz de interpolação na coordenada Y;
- Y_{\max} - Máxima coordenada Y no conjunto de dados georreferenciados;
- Y_{\min} - Mínima coordenada Y no conjunto de dados georreferenciados; e
- ΔY - Tamanho do pixel para a coordenada Y.

Cada pixel do mapa foi interpolado considerando-se as coordenadas X e Y no seu ponto central, conforme apresentado na Figura 3. Esse valor interpolado foi assumido como único para todo o pixel.

Para determinação dos pesos da krigagem, utilizou-se a metodologia proposta por Isaaks e Srivastava (1989), que consiste em resolver o seguinte sistema equações 10.

$$\begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1j} & 1 \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2j} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{i1} & C_{i2} & \dots & C_{ij} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_i \\ \mu \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_i \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Em que:

- C_{ij} - Estimador da covariância entre os valores observados nos pontos amostrados i e j ;
- C_{i0} - Estimador da covariância entre um ponto amostrado em campo e o ponto a ser estimado;
- w_i - Pesos de cada ponto amostrado ao ponto não amostrado; e
- μ - Multiplicador de Lagrange.

A estimativa da covariância é determinada em função da distância de separação do ponto a ser estimado ao ponto amostrado. Para isso, converteu-se a função de semivariância teórica ajustada para a função de covariância. Nas Equações 11, 12, 13 e 14 estão apresentadas as funções de covariâncias, implementadas a partir da utilização dos parâmetros ajustados nas semivariâncias teóricas.

a) Linear com patamar

$$C(h) = \begin{cases} C_1 - C_1 \frac{h}{A} & \text{se } h < A \text{ e } h > 0 \\ 0 & \text{se } h \geq A \\ C_0 + C_1 & \text{se } h = 0 \end{cases} \quad (11)$$

b) Esférico

$$C(h) = \begin{cases} C_1 - C_1 \left[\frac{3h}{2A} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] & \text{se } h < A \text{ e } h > 0 \\ 0 & \text{se } h \geq A \\ C_0 + C_1 & \text{se } h = 0 \end{cases} \quad (12)$$

c) Gaussiano

$$C(h) = \begin{cases} C_1 \cdot \exp\left(-3 \left(\frac{h}{A} \right)^2\right) & \text{se } h > 0 \\ C_0 + C_1 & \text{se } h = 0 \end{cases} \quad (13)$$

d) Exponencial

$$C(h) = \begin{cases} C_1 \cdot \exp\left(-3 \frac{h}{A}\right) & \text{se } h > 0 \\ C_0 + C_1 & \text{se } h = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Para resolução do sistema de equação apresentado na Equação 10, foi implementado o método de eliminação de Gauss. Dessa forma, o valor estimado de cada pixel é obtido pela Equação 15.

$$Z(x_0) = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_i \end{Bmatrix} \otimes \{Z(x_1) \quad Z(x_2) \quad Z(x_3) \quad \dots \quad Z(x_i)\} \quad (15)$$

A krigagem é realizada somente para os pontos que estão contidos no limite do polígono de contorno da área. Para isso, foi implementado um algoritmo para verificar se os pontos a serem interpolados estão dentro ou fora do polígono. Essa verificação foi realizada de acordo com os seguintes passos:

- 1) Selecione um ponto p1 de coordenada qualquer, com garantia que esteja fora do polígono de contorno, ou seja, fora dos limites máximos e mínimos das coordenadas da área;
- 2) Trace uma semirreta r do ponto p2, a ser interpolado, até o ponto p1, selecionado no passo 1;
- 3) Verifique quantas intersecções houve da semirreta r, do passo 2, com as arestas do polígono de contorno;
- 4) Se houve intersecção da semirreta r exatamente sobre um dos vértices pertencentes ao polígono de contorno, então volte ao passo 1 e selecione outro ponto p1. Caso contrário, vá para o passo 5; e
- 5) Se o número de cruzamentos for par, o ponto p2, a ser interpolado, está fora do polígono de contorno. Caso contrário, está interno ao polígono de contorno.

3.2. Algoritmo para definição de zonas de manejo

Para definir zonas de manejo a partir dos mapas de variabilidade espacial interpolados no item anterior, utilizou-se o algoritmo *fuzzy k-means*. Esse método baseia-se na minimização da Equação 16, conforme apresentado por Minasny e McBratney (2006).

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^q (d_{ij})^2 \quad (16)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n u_{ij} = 1 \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \dots c$$

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} > 0 \quad \text{para } j = 1, 2, 3 \dots n$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\}$$

Em que:

u_{ij} - Elemento (i,j) da matriz de pertinência;

d_{ij} - Distância entre o i-ésimo centro da classe e o j-ésimo ponto da amostra; e

q - Fator de nebulosidade.

Para se encontrar o mínimo da função $J(U, V)$, definiu-se as seguintes condições, conforme Equação 17 e 18.

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^q \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^q} \quad (17)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{w=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{wj}} \right)^{\frac{2}{q-1}}} \quad (18)$$

Em que:

V_i - Centróides das classes.

Para implementação do algoritmo *fuzzy k-means*, utilizou-se os seguintes passos:

- 1) Inicialize os valores dos elementos u_{ij} da matriz de pertinência com números aleatórios entre 0 e 1, satisfazendo as condições descritas na Equações 16;
- 2) Calcule os centróides V_i ($i=1, 2,3\dots c$), utilizando a Equação 17;
- 3) Atualize os valores da matriz de pertinência utilizando-se a Equação 18, obtendo, dessa forma, a matriz de pertinência na iteração ($t+1$); e
- 4) Se atingiu o número de iterações máximas definidas inicialmente ou a diferença $\|u_{ij}^t - u_{ij}^{t+1}\| < \xi$, então finaliza o algoritmo. Se nenhuma das condições forem atingidas, então volta ao passo 2.

Para o cálculo da distância d_{ij} entre o i -ésimo centro da classe e o j -ésimo ponto da amostra, utilizou-se a distância euclidiana – conforme apresentado pela Equação 19 – em que x e y são dois vetores n -dimensionais.

$$de = \|x - y\| = \left[(x_1 - y_1)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

3.2.1. Número de classes para as zonas de manejo

Para obter o número ótimo de classes, determinou-se o valor de dois índices, o Índice de Performance Fuzzy (FPI – “Fuzziness Performace Index”) e Entropia da Partição Modificada (MPE – “Modified Partition Entropy”), apresentados na Equação 20 e 21 (SONG *et al.*, 2009), respectivamente.

$$FPI = 1 - \frac{c}{c-1} \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ij})^2}{n} \right] \quad (20)$$

$$MPE = - \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ij} \cdot \log(u_{ij})}{n \cdot \log(c)} \quad (21)$$

O FPI é uma medida do grau de separação dos membros das diferentes classes. O MPE estima o grau de desorganização criado por um determinado número de classes. Os índices FPI e MPE podem variar de 0 a 1. Valores próximos de 0 (zero) indicam classes distintas com poucas amostras de baixa adesão; próximos a 1 (um) indicam classes não distintas, com um elevado número de amostras de baixa adesão. Dessa forma, o número ótimo de classes ocorre quando os dois índices são mínimos (SONG *et al.*, 2009).

3.3. Medição da condutividade elétrica aparente do solo

A condutividade elétrica aparente do solo foi determinada no período de 07 a 09 de julho de 2009, no município de Araponga, MG, na Fazenda Braúna. Essa fazenda apresenta uma área de 306 ha, sendo 86 ha cultivados com café da espécie *Coffea arabica L.* A altitude média é de 904 m, apresenta relevo montanhoso e o solo predominantemente classificado como Latossolo Vermelho Amarelo. A área, conforme apresentada na Figura 4, é dividida em talhões de café com diferentes fases de desenvolvimento e características culturais identificadas.

A Fazenda Braúna foi selecionada para realização desse trabalho, por ser uma propriedade com alto nível tecnológico, boa organização administrativa e operacional. Encontra-se em uma região de renome em produção de café com qualidade da bebida especial, com relevo e clima de interesse para realização do trabalho. Além disso, a fazenda apresenta banco de dados de idade e densidade de plantas, variedade, espaçamento, faces de exposição ao sol, e estudo de variabilidade espacial da qualidade de bebida do café. Esses dados foram obtidos em pesquisas conduzidas, utilizando-se da agricultura de precisão entre 2004 a 2007.

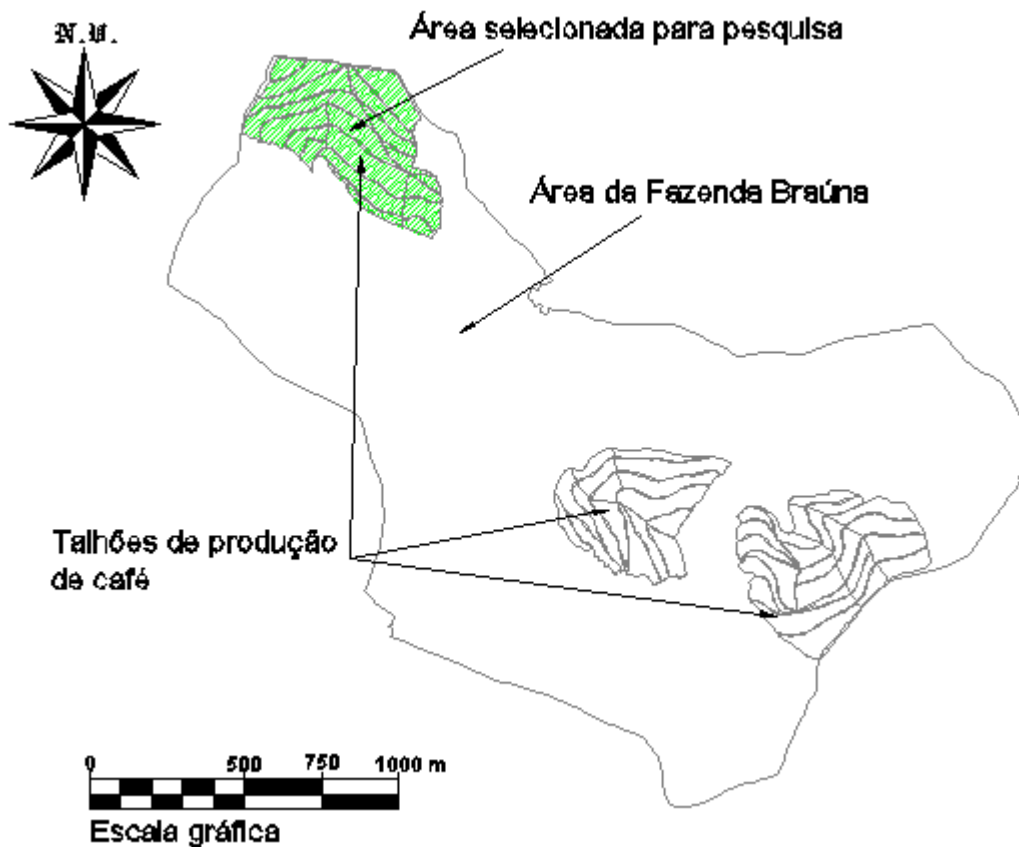


Figura 4. Mapa da Fazenda Braúna apresentando as áreas de produção de café e a área selecionada para a pesquisa.

Para determinação da condutividade elétrica aparente do solo, foi utilizado o medidor portátil ERM-02 de fabricação da *Landviser*, conforme apresentado na Figura 5. Esse equipamento utiliza o método da resistividade, no qual diferentes configurações de eletrodos podem ser empregadas.

Para realização do trabalho foram utilizadas duas configurações de *Matriz de Wenner*, apresentada na Figura 1, com espaçamentos de 0,20m e 0,40m entre eletrodos. Para construção da estrutura de suporte dos eletrodos foram utilizados tubos de PVC, parafusos de aço para os eletrodos e fios flexíveis em cores diferentes para eletrodos de corrente e eletrodos usados na determinação da diferença de potencial. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as configurações de eletrodos construídas para realização do trabalho.



Figura 5. Medidor de condutividade elétrica aparente do solo modelo ERM-02.

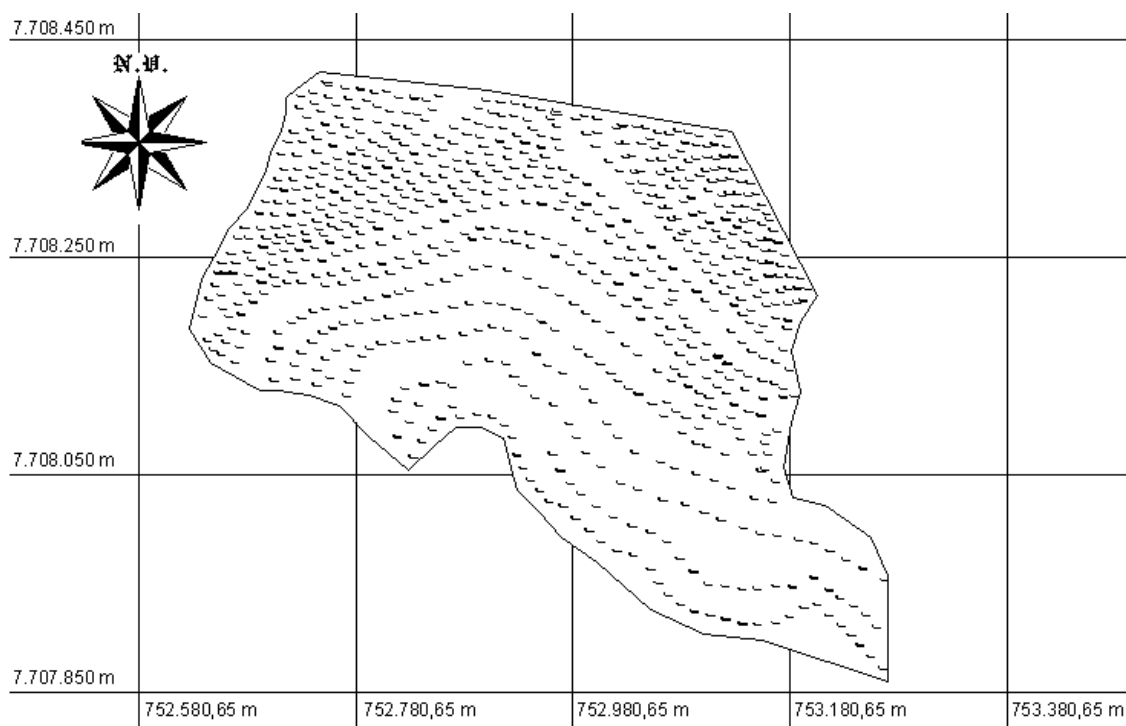


Figura 6. Configuração da *Matriz de Wenner* com espaçamentos entre eletrodos de 0,20 m.



Figura 7. Configuração da *Matriz de Wenner* com espaçamentos entre eletrodos de 0,40 m.

A condutividade elétrica aparente do solo foi determinada em uma área de 20,20 ha da Fazenda Braúna. Foram amostrados 783 pontos de condutividade elétrica a 0,20 e 0,40 m, conforme apresentado na Figura 8.



Datum: SAD69 UTM FUSO 23S

Figura 8. Área selecionada para a pesquisa e localização dos pontos em que foram determinados a condutividade elétrica aparente do solo na Fazenda Braúna.

3.4. Determinação da textura e propriedades químicas do solo

Para determinação da textura e propriedades químicas do solo foram coletadas 141 amostras distribuídas em toda área de estudo. Cada amostra foi composta de três amostras simples, coletadas em um raio de um metro, em torno de uma amostra de condutividade elétrica. As amostras de solo foram analisadas em laboratório para obtenção da composição textural (argila, silte, areia fina e grossa), condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5), umidade e fertilidade do solo (pH, acidez potencial, teores de P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H-Al, SB, CTC efetiva, CTC a pH 7, V, m, P-rem, Zn, Fe, Mn, Cu e matéria orgânica).

Para complementar a caracterização do solo, foi determinada a curva de retenção de água, utilizando-se o método Extrator de Richards (RICHARDS, 1965). Para isso, foram selecionadas, ao acaso, 15 dentre as 141 amostras de solo.

Empregando os dados de condutividade elétrica obtidos em um mesmo local, no qual foi realizada a amostra de solo, foi determinado o coeficiente de correlação de Pearson, para a textura e propriedades químicas do solo em relação à condutividade elétrica aparente.

3.5. Georreferenciamento dos dados para elaboração dos mapas de variabilidade espacial

Cada ponto amostrado foi georreferenciado, utilizando o aparelho DGPS modelo Promark 3, fabricado pela Magellan. Para correção diferencial foram utilizados os dados da base da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE, localizada na UFV, e o *software* GNSS *solution* da Magellan. Os mesmos dados utilizados para georreferenciamento dos pontos amostrados foram utilizados para determinação do modelo digital de elevação com altitude geométrica. Os mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica, propriedades do solo e o modelo digital de elevação foram elaborados no sistema de apoio à decisão desenvolvido.

3.6. Avaliações das zonas de manejo obtidas utilizando o sistema desenvolvido

Os dados coletados em campo foram inseridos no sistema e interpolados pelo método de krigagem para geração dos mapas de variabilidade espacial. Para realização das interpolações foram ajustadas as funções teóricas de semivariograma. Para isso, utilizou-se os dados das propriedades do solo, condutividade elétrica aparente à 0,20 m (CE20), condutividade elétrica aparente à 0,40 m (CE40) e a elevação do terreno. Todas as interpolações foram feitas utilizando-se um tamanho de pixel de 5 x 5 metros, para as coordenadas X e Y, e mesmo polígono de contorno. Portanto, todos os mapas gerados apresentam o mesmo número de píxeis e se sobrepõem.

Os mapas interpolados foram classificados com a utilização do algoritmo *fuzzy k-means* implementado no sistema. Foi definido, para realização da classificação de todos os mapas interpolados, um número máximo de iterações igual a 100 (cem), coeficiente fuzzy igual a 2 (dois) e dados normalizados com média 0 (zero) e desvio padrão 1 (um). O algoritmo *fuzzy k-means* utiliza a distância euclidiana para o cálculo da proximidade entre as amostras. A classificação foi realizada com duas, três, quatro e cinco classes.

Foram gerados seis diferentes mapas de zonas de manejo, conforme apresentado a seguir:

- Zona de manejo com base em altitude (ZMA);
- Zona de manejo com base em CE20 (ZM20);
- Zona de manejo com base em CE40 (ZM40);
- Zona de manejo com base em CE20 e altitude (ZM20A);
- Zona de manejo com base em CE40 e altitude (ZM40A); e
- Zona de manejo com base em CE20, CE40 e altitude (ZM2040A).

Para análise da concordância entre as zonas de manejo e as propriedades do solo, efetuou-se a tabulação cruzada entre os mapas com o mesmo número de classes (PONZONI, ALMEIDA, 1996). Foram realizadas tabulações entre os 6 (seis) mapas de zonas de manejo e os 22 (vinte e dois) mapas de propriedades do solo.

O maior coeficiente Kappa entre duas classificações ocorre quando a concordância é maximizada (KITCHEN *et al.*, 2005). Para isso, foi realizado um reordenamento do rótulo da classificação no mapa de zonas de manejo, com base na maximização da diagonal principal da matriz de tabulação cruzada. Dessa forma, classes rotuladas, por exemplo, como classe 1, poderia ser modificada para classe 3. O interesse das zonas de manejo é separar áreas que podem ser consideradas homogêneas para determinadas características que influenciam, direta ou indiretamente, a produtividade e qualidade da cultura. Uma modificação nos rótulos das classes não modificaria o conceito das zonas de manejo.

A diagonal principal da tabulação cruzada foi obtida com a maximização de W , conforme Equação 22.

$$W = \text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (22)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq 1 \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Em que c_{ij} são os elementos da matriz de tabulação cruzada e x_{ij} assume valor 1, se a linha i e coluna j é selecionada para pertencer a diagonal principal, 0 em caso contrário.

O problema descrito pela Equação 22 foi resolvido utilizando-se o algoritmo Húngaro (RODRIGUES *et al.*, 2005) de otimização combinatória para alocação de tarefas. Esse algoritmo foi necessário, pois a análise de todas as combinações para se encontrar o máximo da diagonal principal com um grande número de classes (n), seria impraticável em tempo computacional aceitável. Para maximizar a diagonal principal, utilizando-se o algoritmo Húngaro, os elementos da matriz c_{ij} foram multiplicados por -1, pois o algoritmo é de minimização.

O algoritmo Húngaro foi implementado utilizando-se os seguintes passos, segundo Rodrigues *et al.* (2005):

- 1) Subtraia o menor elemento de cada linha de todos os elementos da mesma linha. Da matriz resultante, subtraia o menor elemento de cada coluna de todos os elementos da mesma coluna;
- 2) Trace o menor número possível de linhas que cubram os zeros existentes nas colunas e linhas da matriz. Se o número de linhas for igual à dimensão da matriz, então pare. A solução foi encontrada. Caso contrário, vá para o passo 3; e
- 3) Determine o menor elemento entre os elementos não riscados na matriz, subtraia esse elemento de todos os elementos não riscados e some a todos os elementos duplamente riscados.

Para traçar o menor número de linhas que cubram os zeros existentes nas linhas e colunas da matriz, utilizou-se o seguinte algoritmo:

- 1) Marque as linhas da matriz que não tenham alocações de tarefas;
- 2) Marque todas as colunas que tenham zeros em linhas marcadas;
- 3) Marque as linhas que tenham alocações de tarefas em colunas marcadas;
- 4) Volte ao passo 2 e 3 até não ser mais possível marcar linhas e colunas; e
- 5) Trace uma linha sobre cada linha da matriz não marcada e sobre cada coluna marcada.

Após o reordenamento do rótulo do mapa de zona de manejo e construção da tabulação cruzada, também denominada matriz de confusão, determinou-se o coeficiente Kappa. Para avaliação da qualidade de classificação da textura e propriedades químicas do solo, utilizaram-se os mapas de zonas de manejo – conforme

metodologia apresentada por Kitchen *et al.* (2005), Valckx *et al.* (2009) e Song *et al.* (2009). O coeficiente Kappa indica a qualidade da classificação em relação a uma classificação ao acaso. Dessa forma, consideraram-se as classes das propriedades do solo como sendo a verdade de campo e, os mapas de zona de manejo, como sendo o classificador.

O coeficiente Kappa foi obtido pela Equação 23, conforme Congalton e Mead (1986).

$$Ka = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} \cdot x_{\oplus i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} \cdot x_{\oplus i}} \quad (23)$$

Em que:

- Ka - Estimativa do coeficiente Kappa;
- x_{ii} - Elemento da matriz de confusão na linha i e coluna i ;
- $x_{i\oplus}$ - Somatório dos elementos da linha i da matriz de confusão;
- $x_{\oplus i}$ - Somatório dos elementos da coluna i da matriz de confusão.
- c - Número total de classes; e
- n - Número total de amostras.

O teste da significância da matriz de confusão foi realizado, utilizou-se Equação 24, conforme Congalton e Mead (1986).

$$Z_{cal} = \frac{Ka}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(Ka)}} \quad (24)$$

Em que:

- Z_{cal} - Estatística Z padronizada e distribuída normalmente; e
- $\hat{\sigma}^2$ - Variância do coeficiente Kappa.

O cálculo da variância, $\hat{\sigma}^2$, para o coeficiente Kappa, foi obtido pela Equação 25.

$$\hat{\sigma}^2(Ka) = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (25)$$

Os valores de θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4 podem ser determinas pelas Equações 26, 27, 28 e 29.

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c x_{ii} \quad (26)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} \cdot x_{\oplus i} \quad (27)$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{ii} (x_{i\oplus} + x_{\oplus i}) \quad (28)$$

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_{ij} (x_{j\oplus} + x_{\oplus j})^2 \quad (29)$$

Para testar a significância entre dois coeficientes Kappa independentes, utilizou-se a Equação 30, conforme Congalton e Mead (1986).

$$Z = \frac{|K_1 - K_2|}{\sqrt{\hat{\sigma}^2(K_1) + \hat{\sigma}^2(K_2)}} \quad (30)$$

Em que K1 e K2 são os coeficientes Kappa que estão sendo comparados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Correlações entre condutividade elétrica aparente, altitude e propriedades do solo

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados das análises estatísticas descritivas para a altitude, a CE20, a CE40 e as propriedades do solo. Nessa tabela é possível verificar que a CE20 apresentou um coeficiente de variação maior do que para a CE40, o que indica uma maior oscilação dos valores da CE20. Esse fato foi causado, provavelmente, pelas maiores variações que ocorrem nas primeiras camadas do solo com relação às propriedades físicas e químicas do solo.

Os valores médios da CE20 e CE40 foram, respectivamente, de $1,80 \text{ mS m}^{-1}$ e $1,22 \text{ mS m}^{-1}$. Esses valores podem ser considerados baixos em relações a valores de condutividade elétrica aparente em solos salinos, conforme apresentado por Yan *et al.* (2007c) e Yan *et al.* (2008). Nesses trabalhos, os autores encontraram um valor médio de condutividade elétrica aparente do solo de $135,7 \text{ mS m}^{-1}$ e $86,18 \text{ mS m}^{-1}$, respectivamente. Os valores médios e o coeficiente de variação obtidos na área de produção de café estão na faixa dos valores encontrados por Machado *et al.* (2006) e Aimrun *et al.* (2007), que obtiveram valores médios de condutividade elétrica aparente do solo de $5,2 \text{ mS m}^{-1}$ e $5,67 \text{ mS m}^{-1}$, respectivamente. O coeficiente de variação determinados por Machado *et al.* (2006) e Aimrun *et al.* (2007) foram de 48% e 54%, respectivamente. Faulin *et al.* (2005), em medições de condutividade elétrica em períodos e áreas diferentes, obtiveram valores médios de condutividade elétrica variando de 1,8 a $11,2 \text{ mS m}^{-1}$.

Os valores mínimos e máximos de condutividade elétrica encontrados foram de 0,40 e 5,24 mS m⁻¹. Esses valores apresentam amplitude inferior aos determinados por Machado *et al.* (2006), que obtiveram os valores mínimos e máximos de 1,90 e 13,70 mS m⁻¹, respectivamente. Aimrun *et al.* (2007) alcançaram valores mínimos e máximos de 0,90 e 64,10 mS m⁻¹. Faulin *et al.* (2005) obtiveram valores de condutividade elétrica aparente do solo variando de 0,60 a 24,2 mS m⁻¹. No entanto, como o maior interesse do presente trabalho é na variabilidade espacial da condutividade elétrica, a magnitude dos dados não é fator limitante para se definir zonas de manejo. Para interpretação da variabilidade espacial da condutividade elétrica, devem-se realizar amostragens de solo nas zonas de manejo definidas.

Os valores médios da umidade do solo determinados foram mais elevados em relação aos valores obtidos por Faulin *et al.* (2005), que obtiveram valores médios de umidade entre 0,16 a 0,23 kg kg⁻¹. Pelas 15 (quinze) curvas de retenção de água no solo determinadas, apresentado no Apêndice A, verificou-se que o solo estava na capacidade de campo ou próximo a ela. Além disso, verifica-se que os valores médios de teores de argila foram também mais elevados em relação aos obtidos por Faulin *et al.* (2005), que obtiveram valores médios de teores de argila de 21,50 e 23,09 dag kg⁻¹, respectivamente, em duas áreas diferentes. No entanto, os baixos valores de condutividade elétrica do solo – determinados no presente trabalho – podem ter tido esse resultado devido ao baixo grau de saturação do solo, baixa densidade do solo ou baixa capacidade de troca de cátions, conforme relatado por Corwin e Lesh (2005b), sendo que a capacidade de troca de cátions está relacionada com o teor e tipo de argila e teor de matéria orgânica no solo.

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados obtidos em campo

Variável	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Desvio Padrão	Curtose	Assimetria	Coefficiente de Variação
Altitude (m)	913,95	854,29	979,14	885,31	913,91	945,01	35,64	-1,14	-0,07	3,90
CE20 ¹ (mS m ⁻¹)	1,80	0,40	5,24	1,18	1,62	2,35	0,87	1,93	1,16	48,16
CE40 ² (mS m ⁻¹)	1,22	0,40	3,45	0,85	1,08	1,51	0,53	3,07	1,47	43,28
Umidade (kg kg ⁻¹)	0,31	0,21	0,42	0,28	0,31	0,33	0,04	0,35	0,24	12,40
pH ³	5,76	4,83	7,74	5,39	5,69	6,07	0,50	1,52	0,88	8,63
Fósforo (P) (mg dm ⁻³)	4,36	1,10	22,10	2,70	3,80	5,10	2,53	17,20	3,16	57,90
Potássio (K) (mg dm ⁻³)	89,21	17,00	165,00	65,00	81,00	114,00	32,06	-0,64	0,39	35,94
Cálcio (Ca ²⁺) (cmolc dm ⁻³)	2,70	0,43	9,22	1,89	2,63	3,35	1,20	6,06	1,57	44,66
Magnésio (Mg ²⁺) (cmolc dm ⁻³)	1,21	0,21	3,71	0,88	1,16	1,46	0,48	4,22	1,19	39,52
Acidez trocável (Al ⁺³) (cmolc dm ⁻³)	0,20	0,00	1,17	0,00	0,09	0,29	0,27	2,05	1,59	135,95
H + Al ⁴ (cmolc dm ⁻³)	7,44	0,50	12,70	5,70	7,60	9,20	2,45	-0,04	-0,31	32,92
SB ⁵ (cmolc dm ⁻³)	4,13	0,74	11,51	2,90	3,98	5,10	1,61	2,73	1,00	38,89
CTC t ⁶ (cmolc dm ⁻³)	4,33	1,71	11,51	3,26	4,20	5,12	1,44	4,23	1,38	33,30
CTC T ⁷ (cmolc dm ⁻³)	11,57	5,62	16,27	10,41	11,63	12,73	1,91	0,52	-0,31	16,50
V ⁸ (%)	36,75	6,50	94,50	25,40	34,00	45,70	15,59	1,61	0,97	42,41
m ⁹ (%)	6,43	0,00	59,10	0,00	2,40	9,20	9,96	7,15	2,40	155,02
Matéria Orgânica (MO) (dag kg ⁻¹)	5,42	2,50	7,96	4,70	5,35	6,06	1,03	0,04	0,08	18,93
P-rem ¹⁰ (mg L ⁻¹)	19,26	11,30	31,60	16,00	18,90	21,80	4,17	0,26	0,68	21,64
Zinco (Zn) (mg dm ⁻³)	2,05	0,35	5,75	1,06	1,93	2,70	1,17	0,26	0,80	57,21
Ferro (Fe) (mg dm ⁻³)	45,13	18,80	120,30	33,70	41,70	52,40	17,09	4,67	1,72	37,87
Manganês (Mn) (mg dm ⁻³)	9,26	2,30	42,30	5,70	8,00	11,00	5,73	9,60	2,45	61,94
Cobre (Cu) (mg dm ⁻³)	0,86	0,10	2,88	0,44	0,79	1,12	0,53	1,69	1,12	61,25
CEe1:5 ¹¹ (mS m ⁻¹)	5,00	4,00	9,00	5,00	5,00	6,00	1,00	0,68	0,72	16,71
Areia Grossa (dag kg ⁻¹)	26,78	17,00	41,00	24,00	27,00	30,00	4,39	0,02	0,28	16,41
Areia Fina (dag kg ⁻¹)	12,16	7,00	20,00	11,00	12,00	13,00	1,90	1,36	0,48	15,59
Silte (dag kg ⁻¹)	7,49	4,00	15,00	6,00	7,00	9,00	2,04	0,91	0,89	27,30
Argila (dag kg ⁻¹)	53,57	39,00	66,00	50,00	54,00	57,00	4,90	-0,04	-0,23	9,14

^{1/} CE20, Cond. Elétrica Aparente do solo à 0,20 m de profundidade; ^{2/} CE40, Cond. Elétrica Aparente do solo à 0,40 m de profundidade; ^{3/} pH, Acidez Ativa em água; ^{4/} H + AL, Acidez Potencial; ^{5/} SB, Soma de Bases Trocáveis; ^{6/} CTC t, Capacidade Efetiva de Troca de Cátions; ^{7/} CTC T, Capacidade de Troca Cátions a pH 7; ^{8/} V, Saturação por Bases; ^{9/} m, Saturação por Alumínio; ^{10/} P-rem, Fósforo remanescente; ^{11/} CEe1:5, Cond. Elétrica do Extrato de Saturação do Solo com diluição em cinco partes de água destilada.

Na Tabela 2 estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre a CE20, a CE40 e as propriedades do solo. Pela análise da tabela é possível verificar que a CE20 e a CE40 apresentaram forte correlação entre si, concordando com resultados obtidos por Vitharana *et al.* (2008) em estudo semelhante. A CE40 apresentou coeficientes de correlação mais elevados, em relação a CE20, para a maior parte das propriedades do solo. Esse fato pode ter sido causado pelas maiores variações nas características físicas e químicas que ocorreram nas primeiras camadas do solo, aumentando a oscilação da CE20 e reduzindo as correlações.

A CE20 e a CE40, em geral, apresentaram correlação de baixa magnitude, porém significativa com as propriedades químicas do solo. Os coeficientes de correlação de maior magnitude foram observados para o fósforo remanescente com valores de 0,427 e 0,465, respectivamente, ambos significativos em nível de 1% de probabilidade. Por outro lado, apresentaram correlação não-significativa com as propriedades físicas do solo, exceto para Silte, que apresentou correlação significativa. As correlações mais elevadas determinadas por Cambouris *et al.* (2006) foram para acidez trocável; por Bekele *et al.* (2005) e Yan *et al.* (2007c) foram para o potássio; por Sudduth *et al.* (2005) e Corwin *et al.* (2003) foram para o teor de argila, umidade e capacidade de troca de cátions; e por Corwin *et al.* (2006) e Yan *et al.* (2007c) foram para a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo. Ao analisar os resultados obtidos pelos autores, no presente trabalho, verifica-se que baixas correlações entre condutividade elétrica e teor de argila foram observadas, geralmente, quando o coeficiente de variação do teor de argila foi baixo. Nesse caso, a condutividade elétrica se correlaciona com diferentes propriedades do solo. Quando a área apresenta alta variabilidade do teor de argila, geralmente, há forte correlação entre essa propriedade e a condutividade elétrica aparente do solo.

Vários autores (MACHADO *et al.*, 2006; LESCH *et al.*, 2005; MOLIN; CASTRO, 2008) obtiveram forte correlação entre condutividade elétrica e teor de argila. As correlações da condutividade elétrica aparente do solo e o teor de argila, apesar de alto na grande maioria das pesquisas, em algumas pesquisas (CORWIN; LESCH, 2005b; MORARI *et al.*, 2009; CAMBOURIS *et al.*, 2006; CORWIN *et al.*, 2006; AIMRUN *et al.*, 2007; CARROLL e OLIVER, 2005), incluindo o presente trabalho, a correlação entre condutividade elétrica aparente do solo foi baixa ou inexistente. O baixo coeficiente de variação do teor de argila pode ser a principal justificativa da falta de correlação com a condutividade elétrica. No entanto, o teor de

argila apresentou coeficiente de correlação mais elevados, da mesma forma que CE20 e CE40, com relação ao fósforo remanescente. Apesar de não apresentar correlação com o teor de argila, a correlação com o fósforo remanescente está relacionada com a variabilidade das propriedades físico-químicas, mineralógicas e granulométricas do solo (SOUZA *et al.* 2006; EBERHARDT *et al.*, 2008).

Observa-se que os valores mais elevados de coeficiente de correlação determinado para a CE20 e CE40 foram com relação ao fósforo remanescente. O fósforo remanescente e o teor de argila devem ser analisados para interpretação da disponibilidade de fósforo. Particularmente em latossolos, quanto mais argiloso e mais oxidico, maior a capacidade de adsorção de fósforo e menor o valor de fósforo remanescente. Se o silte e a areia fossem constituídos de somente minerais primários, era de se esperar que apresentassem baixa capacidade de adsorção de fósforo. Entretanto, em latossolos apresentam microagregados do tamanho do silte formado pela ação cimentante dos óxidos de Fe e Al³⁺. Este fato leva a superestimar o percentual de silte em relação ao da argila. Dessa forma, o fósforo remanescente se torna uma alternativa para estimativa do fósforo disponível (DONOGEMMA *et al.*, 2008). No presente trabalho, o coeficiente de correlação mais elevado, entre teor de argila e as propriedades químicas do solo, foi justamente observado para o fósforo remanescente.

Ao se analisar a correlação da umidade com as propriedades do solo, verifica-se que o valor mais elevado, porém de magnitude moderada, foi para a argila com valores de 0,567, significativo ao nível de 1% de probabilidade. O valor absoluto mais elevado de correlação negativa, significativo ao nível de 1% de probabilidade, foi para areia grossa. A umidade do solo não apresentou correlação com a condutividade elétrica aparente, provavelmente, pela baixa variabilidade dos valores de umidade na área. Faulin *et al.* (2005), em um estudo da influência entre a umidade e a condutividade elétrica aparente do solo, concluíram que nos locais onde a amplitude de variação do teor de argila e do teor de umidade foram elevados, os valores de condutividade elétrica apresentaram maiores dependências com o teor de argila e com a umidade do solo. Nesse estudo, os autores obtiveram coeficiente de variação da umidade variando entre 7,30 a 30,51% e, para o teor de argila, de 15,86 a 42,47%. Da mesma forma, os baixos valores de coeficiente de variação determinados, no presente trabalho, de 9,14 e 12,40%, respectivamente, para o teor de argila e umidade do solo, podem ter sido a causa pela não correlação entre umidade e condutividade elétrica.

O valor mais elevado de coeficiente de correlação positivo observado para a altitude em relação às propriedades do solo foi para o teor de silte de 0,367, em nível de significância de 1% de probabilidade. O valor absoluto mais elevado de coeficiente de correlação negativo obtido foi para o zinco de 0,574, significativo ao nível de 1% de probabilidade. Observa-se que a altitude, diferentemente da CE20 e CE40, apresentou coeficiente de correlação positivo com o teor de argila e umidade do solo. Os macros nutrientes potássio e fósforo não apresentaram coeficientes de correlação expressivos com a altitude. Observa-se que, da mesma forma que a CE20 e CE40, não se obteve elevados valores de coeficiente de correlações da altitude com as propriedades do solo.

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson entre as propriedades do solo, altitude local e condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m e 0,40 m de profundidade

	Altitude	CE20	CE40	Umidade	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	CTC t	CTC T
Altitude	1,000													
CE20 ⁽¹⁾	-0,133	1,000												
CE40 ⁽²⁾	-0,176*	0,896**	1,000											
Umidade	0,441**	0,108	0,110	1,000										
pH ⁽³⁾	0,273**	0,275**	0,286**	0,133	1,000									
P ⁽⁴⁾	-0,192*	0,108	0,158*	0,093	-0,092	1,000								
K ⁽⁵⁾	-0,160*	0,287**	0,318**	0,094	0,105	0,316**	1,000							
Ca ²⁺ ⁽⁶⁾	0,133	0,346**	0,386**	0,198**	0,819**	0,217**	0,159*	1,000						
Mg ²⁺ ⁽⁷⁾	0,348**	0,231**	0,230**	0,362**	0,729**	0,107	0,096	0,747**	1,000					
Al ³⁺ ⁽⁸⁾	-0,340**	-0,161*	-0,127	-0,251**	-0,753**	0,044	-0,141*	-0,620**	-0,653**	1,000				
H + Al ⁽⁹⁾	-0,210**	-0,314**	-0,297**	0,097	-0,858**	0,259**	-0,038	-0,621**	-0,536**	0,710**	1,000			
SB ⁽¹⁰⁾	0,195*	0,342**	0,374**	0,261**	0,836**	0,211**	0,199**	0,979**	0,862**	-0,666**	-0,626**	1,000		
CTC t ⁽¹¹⁾	0,154*	0,352**	0,393**	0,243**	0,791**	0,243**	0,195*	0,976**	0,839**	-0,556**	-0,566**	0,990**	1,000	
CTC T ⁽¹²⁾	-0,105	-0,114	-0,066	0,343**	-0,396**	0,509**	0,119	0,029	0,038	0,350**	0,755**	0,039	0,109	1,000
V ⁽¹³⁾	0,212**	0,375**	0,402**	0,088	0,957**	-0,020	0,146*	0,870**	0,744**	-0,714**	-0,890**	0,880**	0,848**	-0,400**
m ⁽¹⁴⁾	-0,291**	-0,202**	-0,179*	-0,286**	-0,705**	-0,016	-0,215**	-0,619**	-0,646**	0,959**	0,634**	-0,666**	-0,564**	0,252**
MO ⁽¹⁵⁾	0,137	-0,205**	-0,178*	0,555**	-0,175*	0,452**	0,056	0,135	0,174*	0,109	0,545**	0,156*	0,194*	0,830**
P-rem ⁽¹⁶⁾	-0,209**	0,427**	0,465**	-0,295**	0,292**	0,108	0,274**	0,292**	0,165*	-0,279**	-0,510**	0,282**	0,262**	-0,417**
Zn ⁽¹⁷⁾	-0,574**	0,174*	0,245**	-0,117	-0,031	0,493**	0,361**	0,177*	0,056	0,045	0,104	0,168*	0,195*	0,274**
Fe ⁽¹⁸⁾	-0,485**	-0,174*	-0,096	-0,343**	-0,526**	0,013	-0,146*	-0,476**	-0,445**	0,529**	0,441**	-0,496**	-0,454**	0,147*
Mn ⁽¹⁹⁾	-0,368**	0,377**	0,457**	-0,073	0,234**	0,535**	0,277**	0,447**	0,321**	-0,170*	-0,162*	0,444**	0,463**	0,167*
Cu ⁽²⁰⁾	-0,495**	0,075	0,110	-0,228**	-0,070	0,280**	0,241**	-0,017	-0,040	0,019	0,013	-0,012	-0,010	0,007
CEe(1:5) ⁽²¹⁾	-0,127	0,123	0,156*	0,015	0,070	0,199**	0,150*	0,150*	-0,109	-0,036	-0,044	0,088	0,092	0,017
Areia Grossa	-0,526**	-0,046	-0,022	-0,581**	0,017	0,113	0,037	0,059	-0,127	0,126	-0,068	0,009	0,033	-0,080
Areia fina	0,005	-0,011	-0,032	-0,457**	-0,112	-0,194*	-0,289**	-0,247**	-0,199**	0,128	-0,095	-0,259**	-0,265**	-0,340**
Silte	0,367**	0,194*	0,195*	0,315**	0,234**	-0,054	-0,009	0,190*	0,217**	-0,211**	-0,271**	0,207**	0,191*	-0,173*
Argila	0,317**	-0,036	-0,049	0,567**	-0,069	-0,003	0,082	-0,037	0,100	-0,074	0,211**	0,006	-0,007	0,276**

Tabela 2. (Continuação) Coeficiente de correlação de Pearson entre as propriedades do solo, altitude local e condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m e 0,40 m de profundidade

	V	m	MO	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	CEe(1:5)	Areia Grossa	Areia fina	Silte	Argila
V	1,000												
M	-0,685**	1,000											
MO	-0,216**	0,050	1,000										
P-rem	0,424**	-0,285**	-0,511**	1,000									
Zn	0,047	-0,024	0,167*	0,317**	1,000								
Fe	-0,506**	0,522**	-0,106	-0,072	0,181*	1,000							
Mn	0,331**	-0,229**	0,040	0,382**	0,579**	0,043	1,000						
Cu	-0,013	-0,013	-0,078	0,342**	0,736**	0,230**	0,417**	1,000					
CEe(1:5)	0,094	-0,049	0,025	-0,072	0,069	-0,033	0,206**	-0,025	1,000				
Areia Grossa	0,056	0,133	-0,223**	0,262**	0,301**	0,183*	0,248**	0,262**	0,216**	1,000			
Areia fina	-0,109	0,186*	-0,459**	0,253**	-0,183*	0,348**	-0,076	0,045	-0,047	0,146*	1,000		
Silte	0,252**	-0,200**	-0,063	0,195*	-0,208**	-0,255**	-0,036	-0,161*	0,050	-0,335**	0,062	1,000	
Argila	-0,113	-0,108	0,405**	-0,415**	-0,112	-0,192**	-0,178*	-0,186*	-0,196**	-0,814**	-0,544**	-0,141	1,000

¹⁷ CE20, Cond. Elétrica Aparente do solo à 0,20 m de profundidade; ² CE40, Cond. Elétrica Aparente do solo à 0,40 m de profundidade; ³ pH, Acidez Ativa em água; ⁴ P, Fósforo; ⁵ K, Potássio; ⁶ Ca²⁺, Cálcio; ⁷ Mg²⁺, Magnésio; ⁸ Al³⁺, Acidez Trocável; ⁹ H + AL, Acidez Potencial; ¹⁰ SB, Soma de Bases; ¹¹ CTC t, Capacidade Efetiva de Troca de Cátions; ¹² CTC T, Capacidade de Troca Cátions a pH 7; ¹³ V, Saturação por Bases; ¹⁴ m, Saturação por Alumínio; ¹⁵ M, Matéria Orgânica; ¹⁶ P-rem, Fósforo remanescente; ¹⁷ Zn, Zinco; ¹⁸ Fe, Ferro; ¹⁹ Mn, Manganês; ²⁰ Cu, Cobre; ²¹ CEe1:5, Condutividade Elétrica do Extrato de Solo com diluição em cinco partes de água destilada.

Obs: *Significância ao nível de 5% de probabilidade, **Significância ao nível de 1% de probabilidade.

4.2 Mapas interpolados pela metodologia de krigagem a partir de dados coletados em campo de produção de café de montanha

Os dados georreferenciados de condutividade elétrica aparente do solo a 0,20m de profundidade (CE20), de condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade (CE40) e das propriedades do solo foram cadastrados no sistema de apoio a decisão desenvolvido. Na Figura 9 é apresentada a janela principal do sistema e parte dos respectivos dados cadastrados. Nessa janela, pode-se importar os dados em formato “txt”, separado por vírgula (,) por ponto e vírgula (;) ou por tabulação. Na Figura 9 é possível verificar as colunas de referências para as coordenadas X e Y, indicadas por “Coord X” e “Coord Y”, e a variável a ser interpolada pelo método de krigagem, referenciada por “Z”. A definição dessas variáveis é obrigatória para tornar o processo de interpolação possível de ser calculado.

Após inserir os dados no sistema, pode-se acessar o *menu Interpolação* para ajustar o semivariograma, em seguida clicando em *Krigagem*, conforme apresentado na Figura 10, para elaborar o mapa. Por último, no *menu Manejo*, pode-se acessar a janela para definição das zonas de manejo, utilizando os mapas interpolados.

Para cada uma das variáveis armazenadas no sistema, foram ajustados os semivariogramas, utilizando a janela apresentada na Figura 10. Nessa janela, são apresentados os resultados dos parâmetros de ajustes do Alcance (A), Patamar (C_0+C) e Efeito Pepita (C_0) do modelo de semivariograma teórico selecionado. Além disso, são apresentados os resultados do Índice de Dependência Espacial (IDE), da Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e do Coeficiente de Determinação (R^2) do semivariograma ajustado.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Coord X	Coord Y		Z						
Variável	ID	Coord X	Coord Y	Altitude	CEa 20	Cea 40	Umidade	PH_H2O	P	K	CA
1	1	753111.095	7708363.198	965.118	2.355	1.619	0.31	5.98	2.7	60	3.29
2	2	753134.159	7708331.885	965.847	0.875	0.692	0.3	5.28	2.6	64	1.2
3	3	753155.674	7708291.279	965.514	1.253	0.851	0.32	5.72	3	56	2.74
4	4	753171.972	7708253.177	963.576	1.285	0.825	0.29	5.39	2.7	62	1.8
5	5	753192.86	7708221.798	962.593	3.162	1.43	0.32	5.65	3.1	57	2.22
6	6	753093.044	7708363.418	962.649	1.462	1.493	0.35	5.92	2	46	3.12
7	7	753121.666	7708323.667	963.323	1.12	0.799	0.34	4.98	3.8	52	0.88
8	8	753149.227	7708267.488	961.201	1.376	0.81	0.31	5.34	2.6	45	1.3
9	9	753175.402	7708222.417	958.815	3.03	1.862	0.31	5.49	2.7	64	2.2
10	10	753073.629	7708367.915	959.34	2.189	1.522	0.3	6.08	1.1	41	2.85
11	11	753105.14	7708321.689	960.084	2.418	1.524	0.33	6.01	2.6	123	3.16
12	12	753135.013	7708265.608	956.947	2.345	1.761	0.34	5.93	5.3	68	3.32
13	13	753043.882	7708370.709	952.731	0.967	1.406	0.33	6.12	1.5	55	3.26
14	14	753065.662	7708331.43	952.843	1.494	1.004	0.35	5.95	2.2	89	1.94
15	15	753096.33	7708292.83	952.683	1.777	1.102	0.37	6.24	4.4	128	3.12
16	16	753122.488	7708260.586	952.685	1.141	0.733	0.34	5.69	3.8	70	1.76
17	17	753153.829	7708219.69	952.282	2.046	1.099	0.32	5.65	2.1	55	1.52
18	18	753022.101	7708372.332	948.123	1.426	1.069	0.32	5.37	2.9	87	1.4
19	19	753049.123	7708318.028	945.51	1.221	0.975	0.32	5.67	2.6	78	1.92
20	20	753081.977	7708275.766	945.006	1.689	1.381	0.34	6.19	2.3	77	3.48
21	21	753114.803	7708234.51	944.148	1.18	0.889	0.32	5.63	2.4	43	2.2
22	22	753152.445	7708188.042	943.232	1.49	0.855	0.31	5.6	1.5	41	1.56
23	23	753176.166	7708147.924	933.302	1.916	1.034	0.29	5.65	1.5	77	0.92
24	24	753133.081	7708172.832	932.89	2.63	0.873	0.29	5.39	2.2	63	1.23
25	25	753091.195	7708220.3	933.37	0.434	0.446	0.29	5.55	4.8	80	2.29
26	26	753049.657	7708261.208	933.01	1.245	0.946	0.36	5.65	3.5	69	2.36
27	27	753003.123	7708308.846	933.758	1.744	1.151	0.33	5.48	3.4	66	1.79
28	28	753010.29	7708265.115	925.039	1.619	1.003	0.29	6.74	2.3	83	4.71
29	29	753027.816	7708249.588	922.392	2.675	2.059	0.28	7.74	2.9	65	6.99

Figura 9. Janela principal do sistema de apoio à decisão desenvolvido.

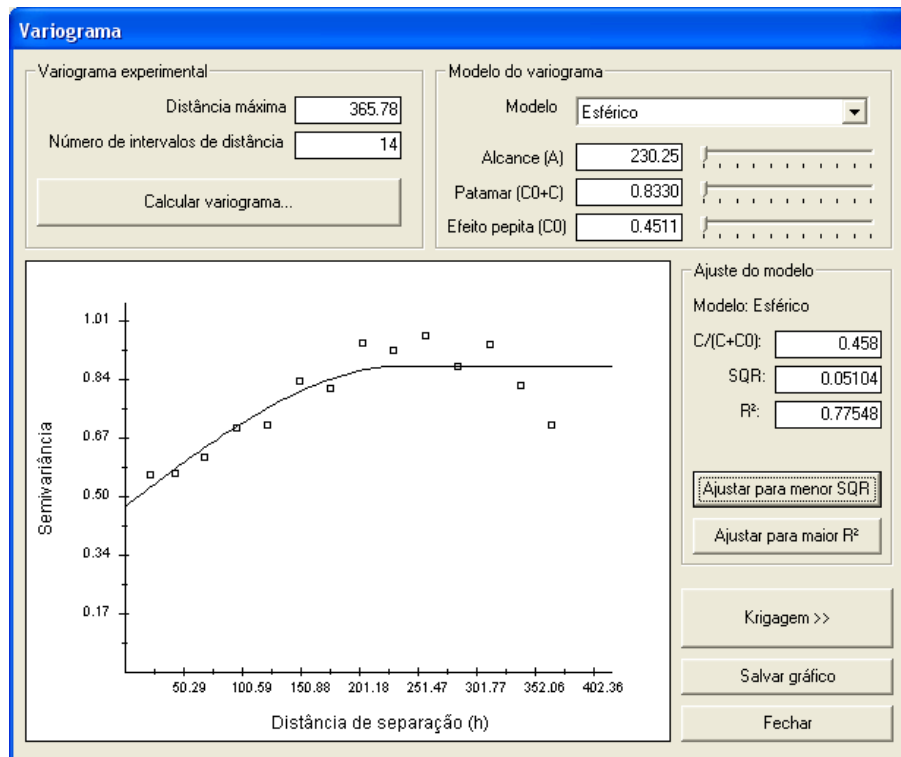


Figura 10. Janela do sistema de apoio à decisão para ajuste dos semivariogramas.

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados dos modelos que melhor se ajustaram às semivariâncias experimentais para a altitude, a CE20, a CE40 e as propriedades do solo, utilizando a janela apresentada na Figura 10. Os gráficos de todos os modelos ajustados podem ser visualizados nas figuras apresentadas no Apêndice B. É possível verificar que o menor alcance determinado foi de 49,64 m para o teor de cálcio. Sendo que os valores de alcance para a CE20 e CE40 foram de 230,25 e 177,22 m, respectivamente. Esse resultado demonstra que a grade amostral adotada de cerca de 40m entre amostras foi suficiente para identificar a dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo. Esses valores de alcance para a condutividade elétrica aparente do solo são próximos aos valores obtidos por Yan *et al.* (2008) de 149,5 m. O índice de dependência espacial (IDE) para a CE20 foi menor do que para a CE40, 45,80% e 52,20%, respectivamente. No entanto, pode-se classificar ambos os valores como moderada dependência espacial, conforme classificação proposta por Zimback (2001). O autor considera fraca dependência espacial quando o IDE < 25%, moderada dependência espacial quando o IDE > 25% e IDE < 75%, e forte dependência espacial quando o IDE > 75%. Molin e Castro (2008) determinaram IDE para a condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0,30 e 0,90 m de 72% e 74%, respectivamente. Os valores obtidos no presente trabalho estão na faixa dos valores alcançados por Faulin *et al.* (2005), os quais determinaram IDE para a condutividade elétrica, que variou de 37% a 95%.

Na janela apresentada pela Figura 11, pode-se verificar que os mapas apresentam um número de pixels total de 121 x 104, sendo que cada pixel tem um tamanho de cinco metros em cada lado. Esse tamanho de pixel foi recomendado por Whelan e McBratney (2003) para geração de zonas de manejo. Como foi definido um polígono de contorno da área – que está inserido no retângulo compreendido pelo intervalo de interpolação de coordenadas mínimas e máximas –, nem todos os pixels, compreendidos entre 121 x 104, são interpolados. Todos os mapas foram armazenados em disco, em arquivos texto com extensão “kri”. Em janelas específicas, os mapas interpolados foram armazenados em disco rígido com extensão “jpg” ou “bmp”. O gráfico de validação cruzada foi obtido para cada mapa interpolado e estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 3. Modelos teóricos de semivariância ajustados para Altitude, CE20, CE40 e propriedades do solo para a Fazenda Braúna.

Variáveis	Modelo	Alcance (A)	Patamar (C0+C)	Efeito Pepita (C0)	IDE (C/(C0+C))	SQR	R ²
Altitude (m)	Gaussiano	338,27	1818,89	21,60	0,9880	105322,32	0,9826
CE20 ¹ (mS m ⁻¹)	Esférico	230,25	0,8330	0,4511	0,4580	5,10 E-2	0,7755
CE40 ² (mS m ⁻¹)	Linear com patamar	177,22	0,3130	0,1496	0,5220	9,30 E-3	0,7961
Umidade (kg kg ⁻¹)	Gaussiano	193,44	1,60 E-3	5,00 E -4	0,7070	1,00 E-6	0,9514
pH ³	Gaussiano	68,59	0,2400	0,1600	0,3340	3,04 E-3	0,5663
Fósforo (P) (mg dm ³)	Exponencial	336,44	8,12	1,96	0,7590	19,86	0,6147
Potássio (K) (mg dm ³)	Exponencial	346,91	1089,90	352,32	0,6770	25639,92	0,9467
Cálcio (Ca ²⁺) (cmolc dm ⁻³)	Gaussiano	49,64	1,4444	0,7443	0,4850	7,30 E-2	0,6923
Magnésio (Mg ²⁺) (cmolc dm ⁻³)	Gaussiano	975,89	0,4795	0,1598	0,6670	2,51 E-2	0,8045
Acidez trocável (Al ⁺³) (cmolc dm ⁻³)	Gaussiano	988,74	0,1406	0,0557	0,6040	2,02 E-3	0,7248
H + Al ⁴ (cmolc dm ⁻³)	Exponencial	77,32	6,13	1,67	0,7270	1,7309	0,7056
SB ⁵ (cmolc dm ⁻³)	Gaussiano	1020,73	4,53	2,19	0,5170	1,65	0,7960
CTC t ⁶ (cmolc dm ⁻³)	Gaussiano	1092,13	3,39	1,79	0,4730	0,67	0,7677
CTC T ⁷ (cmolc dm ⁻³)	Gaussiano	168,89	3,93	2,38	0,3940	1,87	0,6588
V ⁸ (%)	Gaussiano	1082,02	406,10	218,00	0,4630	15300,45	0,7033
m ⁹ (%)	Gaussiano	868,11	187,24	77,07	0,5880	3093,59	0,8239
Matéria Orgânica (MO) (dag kg ⁻¹)	Linear com patamar	157,59	1,1087	0,4926	0,5560	9,92 E-2	0,8323
P-rem ¹⁰ (mg L ⁻¹)	Esférico	270,90	18,96	8,0450	0,5760	32,10	0,7851
Zinco (Zn) (mg dm ⁻³)	Esférico	352,60	1,75	0,56	0,6820	0,10	0,9473
Ferro (Fe) (mg dm ⁻³)	Linear com patamar	362,36	312,20	67,42	0,7840	2225,09	0,9689
Manganês (Mn) (mg dm ⁻³)	Esférico	430,89	43,52	17,94	0,5880	139,07	0,8429
Cobre (Cu) (mg dm ⁻³)	Esférico	365,68	0,3374	0,1578	0,5320	1,75 E-3	0,9595
CEe1:5 ¹¹ (mS m ⁻¹)	Esférico	79,24	0,8513	0,3067	0,6400	97,89 E-3	0,6777
Areia Grossa (dag kg ⁻¹)	Esférico	283,74	22,05	4,28	0,8060	48,39	0,8761
Areia Fina (dag kg ⁻¹)	Esférico	262,90	4,01	0,63	0,8440	0,52	0,9660
Silte (dag kg ⁻¹)	Gaussiano	205,04	4,49	2,91	0,3530	0,45	0,9032
Argila (dag kg ⁻¹)	Linear com patamar	199,59	27,56	3,84	0,8610	35,94	0,9575

^{1/} CE20, Cond. Elétrica Aparente do solo à 0,20 m de profundidade; ^{2/} CE40, Cond. Elétrica Aparente do solo à 0,40 m de profundidade; ^{3/} pH, Acidez Ativa em água; ^{4/} H + AL, Acidez Potencial; ^{5/} SB, Soma de Bases Trocáveis; ^{6/} CTC t, Capacidade Efetiva de Troca de Cátions; ^{7/} CTC T, Capacidade de Troca Cátions a pH 7; ^{8/} V, Saturação por Bases; ^{9/} m, Saturação por Alumínio; ^{10/} P-rem, Fósforo remanescente; ^{11/} CEe1:5, Condutividade Elétrica do Extrato de Solo com diluição em cinco partes de água destilada.

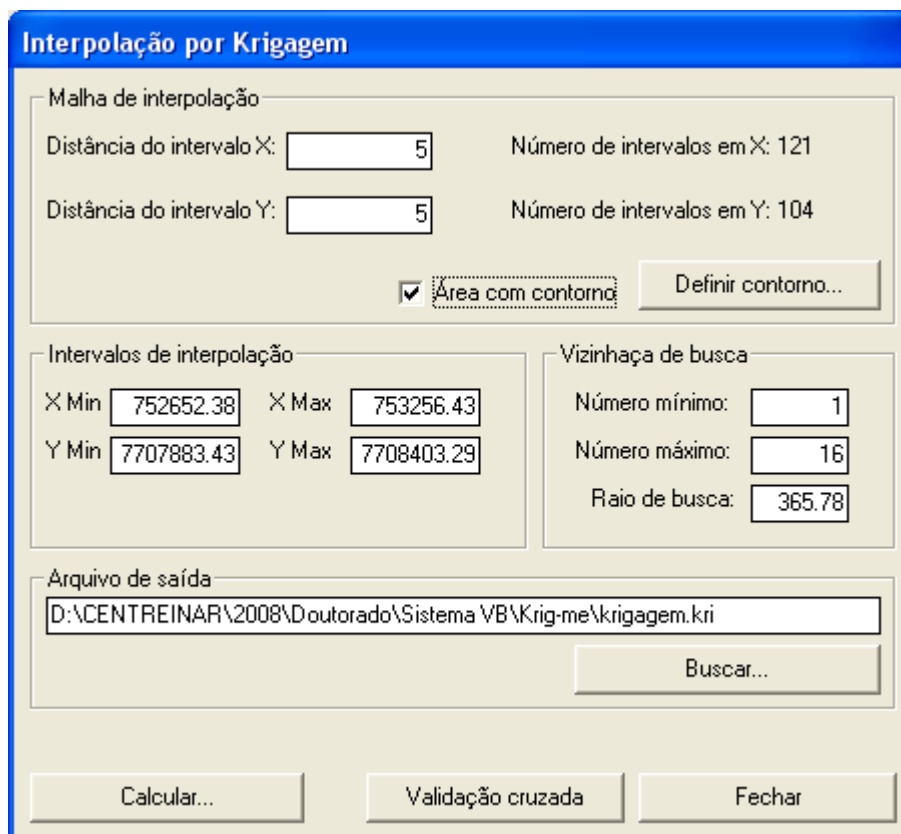


Figura 11. Janela do sistema de apoio à decisão para interpolação dos mapas pela metodologia de krigagem ordinária.

Na Figura 12 está apresentado o resultado dos mapas interpolados pelo método de krigagem ordinária, por meio da janela apresentada na Figura 11 e dos semivariogramas ajustados na Tabela 3. Os mapas apresentam cores que variam do vermelho – para valores mais baixos – ao azul – para valores mais elevados. Foram realizadas análises de correlações de Pearson de todos os mapas em relação ao mapa de CE20. Utilizou-se o mapa de CE20 como referência para cálculo do coeficiente de correlação, pois as amostras de solo foram realizadas no perfil de solo de 0,20 m. Abaixo de cada mapa é apresentado o valor do coeficiente de correlação observado.

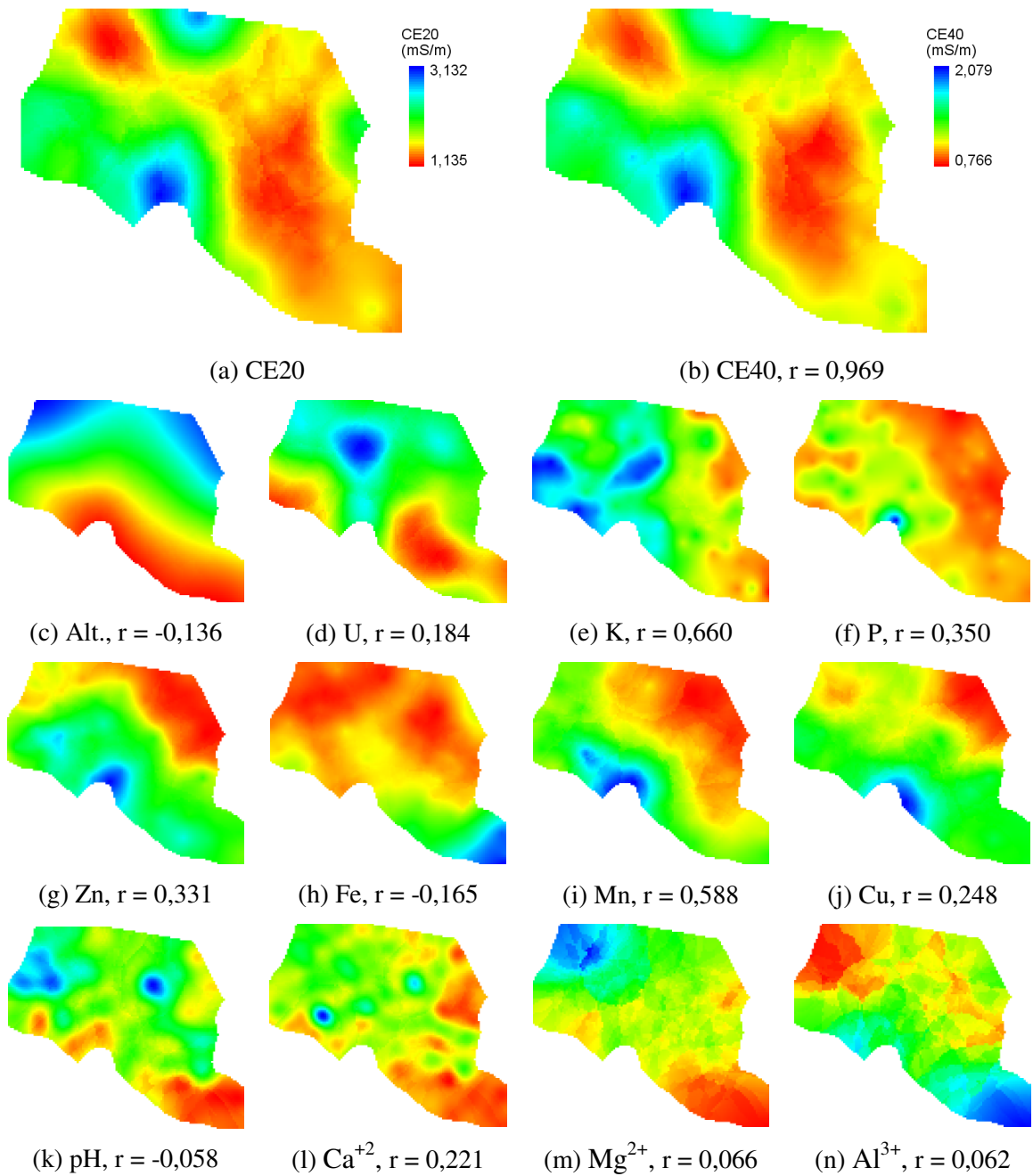


Figura 12. Mapas de variabilidade espacial da (a) condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m de profundidade, (b) condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade, (c) altitude, (d) umidade, (e) potássio, (f) fósforo, (g) zinco, (h) ferro, (i) manganês, (j) cobre, (k) pH, (l) cálcio, (m) magnésio, (n) alumínio, (o) acidez potencial, (p) soma de bases, (q) capacidade de troca de cátions efetiva, (r) capacidade de troca de cátions a pH 7, (s) saturação por bases, (t) saturação por alumínio, (u) matéria orgânica, (v) fósforo remanescente, (w) condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, (x) Areia grossa, (y) Areia fina, (z) Silte, (aa) Argila.

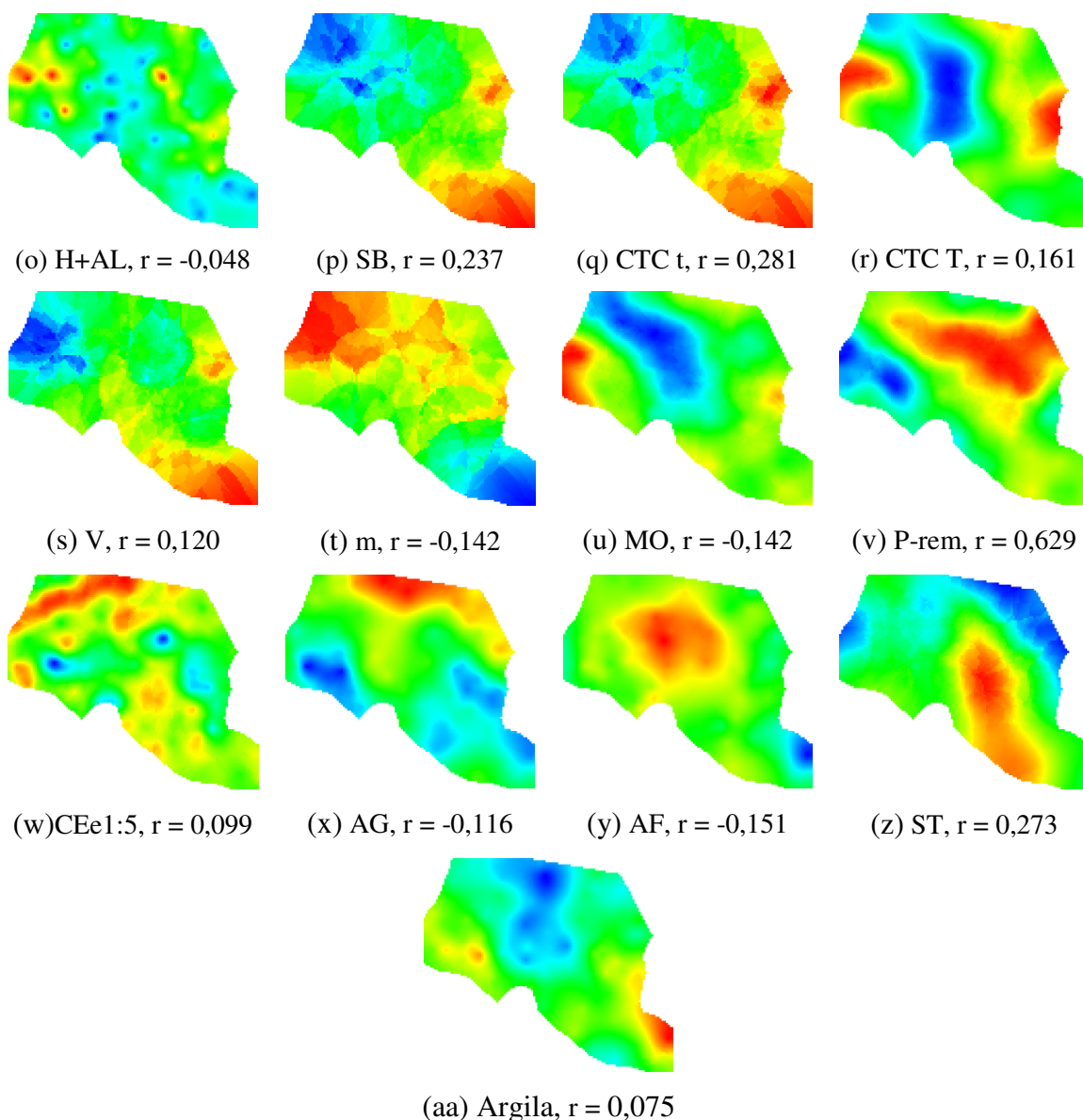


Figura 12. (Continuação) Mapas de variabilidade espacial da (a) condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m de profundidade, (b) condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade, (c) altitude, (d) umidade, (e) potássio, (f) fósforo, (g) zinco, (h) ferro, (i) manganês, (j) cobre, (k) pH, (l) cálcio, (m) magnésio, (n) alumínio, (o) acidez potencial, (p) soma de bases, (q) capacidade de troca de cátions efetiva, (r) capacidade de troca de cátions a pH 7, (s) saturação por bases, (t) saturação por alumínio, (u) matéria orgânica, (v) fósforo remanescente, (w) condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, (x) Areia grossa, (y) Areia fina, (z) Silte, (aa) Argila.

Os mapas de CE20 e CE40 apresentam forte semelhança entre si quanto à variabilidade espacial. Esse fato é confirmado quando se analisa o coeficiente de correlação entre os mesmos, inclusive superando o coeficiente de correlação entre os dados de campo de 0,896. Semelhanças da variabilidade espacial entre mapas de condutividade elétrica aparente em profundidades distintas também foram observadas

por outros pesquisadores (LESH *et al.*, 2005; MOLIN; CASTRO, 2008; VITHARANA *et al.*, 2008) em estudos semelhantes.

A área de produção de café apresenta alta amplitude de variação na altitude. Essa diferença de altitude justifica a utilização do modelo digital de elevação como uma das variáveis para definir zonas de manejo, uma vez que a declividade do terreno influencia no transporte de partículas e nutrientes do solo. Kitchen *et al.* (2005), em estudo semelhante, obtiveram melhores resultados na definição de zonas de manejo quando incluíram o modelo digital de elevação.

Ao se realizar uma comparação entre o mapa de CE20 com os mapas de altitude e umidade do solo, pode-se verificar que não existem semelhanças na variabilidade espacial entre os mesmos. As correlações do mapa de CE20 com a altitude e umidade foram baixas. Observa-se que as áreas com maiores valores de CE20, região em azul do mapa, apresenta altitude baixa e umidade do solo mais elevada. Essa região é um vale plano na qual, recebe água de chuva por escoamento superficial tanto do lado leste e oeste da área, o que poderia modificar a estrutura, a textura e as propriedades químicas do solo, provocando um aumento da condutividade elétrica aparente.

Pela análise do mapa de potássio, pode-se verificar que as regiões que apresentaram valores de disponibilidade de potássio acima da média, representada pela cor verde ao azul no mapa, apresentaram valores acima da média de condutividade elétrica do solo. Esses resultados concordam com obtidos por Bekele *et al.* (2005), em que a condutividade elétrica aumentou com o teor de potássio no solo. O maior coeficiente de correlação observado foi para mapa de potássio. Bekele *et al.* (2005), em um estudo semelhante, também obtiveram as maiores correlações entre condutividade elétrica e potássio. Alguns autores (CARVALHO *et al.*, 1994; SILVA *et al.*, 2002a; SILVA *et al.*, 2002b) destacaram a importância do potássio para a qualidade de bebida do café. Dessa forma, a condutividade elétrica aparente do solo poderá se tornar uma ferramenta útil na definição de zonas de manejo em cafeicultura. Para isso, demais pesquisas devem ser realizadas em áreas e condições diferentes para confirmação dos resultados aqui encontrados.

A região leste da área apresentou a mais baixa disponibilidade de fósforo. Além disso, é possível verificar pela análise do mapa da Figura 12(f), que em regiões com altos valores de disponibilidade de fósforo, há valores elevados de condutividade elétrica aparente do solo. O coeficiente de correlação entre o mapa de fósforo e de CE20 foi baixo, no entanto, foi maior que o valor de correlação observado entre os dados de

campo, conforme apresentado na Tabela 2. Bekele *et al.* (2005) obtiveram correlações do fósforo com a condutividade elétrica variando de -0,03 a 0,58. Esses resultados demonstram que o teor de fósforo no solo não se relaciona consistentemente com a condutividade elétrica aparente, provavelmente devido à influência de outras variáveis mais importantes.

Dentre os mapas de micronutriente, observa-se que os mapas de zinco, manganês e cobre, tiveram um mesmo padrão de variabilidade espacial entre si. A região sul do mapa apresentou valores mais elevados de teores de zinco, manganês e cobre, da mesma forma que a CE20. No entanto, o mesmo não ocorreu com o mapa de ferro, que apresentou o menor coeficiente de correlação dentre os micronutrientes. O padrão de variabilidade espacial que mais se aproximou do mapa de CE20 foi do manganês, que apresentou um coeficiente de correlação mais elevado dentre os micronutrientes.

Ao se comparar os mapas de pH, cálcio, magnésio, soma de bases, capacidade de troca de cátions efetiva e saturação por bases com o mapa de CE20, verifica-se que não houve semelhanças entre os padrões de variabilidade espacial, fato confirmado ao se observar o baixo valor de coeficiente de correlação, determinados para tais variáveis. Na região sudeste dos mapas, referenciada pela cor vermelha, apresentou-se um mesmo padrão do mapa de CE20, com baixo valor de pH, cálcio, magnésio, soma de bases, capacidade de troca de cátions efetiva e saturação por bases.

Quando se compara o mapa de matéria orgânica – capacidade de troca de cátions à pH 7 e teor de argila –, verifica-se que na região central, de norte a sul, os valores das variáveis foram mais elevados. A capacidade de troca de cátions aumenta com o teor de matéria orgânica, qualidade e teor de argila (CIOTTA *et al.*, 2003). Verifica-se que nessa região há uma tendência do aumento do valor da CE20. No entanto, no presente trabalho, não se observou altas correlações dessas variáveis com o mapa de CE20, inclusive o valor da correlação com o teor de argila foi próxima de zero e negativo com o teor de matéria orgânica. Era de se esperar que as correlações entre os mapas de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e teor de argila fossem elevadas e positivas. Molin e Castro (2008) obtiveram altas correlações para matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e teor de argila em relação à condutividade elétrica, apesar de apresentar um teor de argila médio, de 28,4 dag kg⁻¹, inferior ao obtido no presente trabalho. Por outro lado, os autores conseguiram um teor médio de matéria orgânica e CTC, respectivamente, de 38,17 dag kg⁻¹ e 99,49 cmolc dm⁻³, muito

superiores aos determinados no presente trabalho. Reis *et al.* (2005), em latossolo amarelo escuro, também não encontrou correlações entre a condutividade elétrica aparente do solo e teor de argila. No entanto, o autor obteve correlação entre condutividade elétrica e capacidade de troca de cátions. No presente trabalho, verifica-se que a maior parte da área apresentou teor de argila, matéria orgânica e CTC situado em torno do valor médio, representado pela cor verde no mapa. A baixa amplitude de variação das variáveis, baixo valor de matéria orgânica e baixo valor de CTC pode ser a justificativa para a correlação de baixa magnitude dessas variáveis com a CE20.

Recomendações de aplicação de fertilizantes e corretivos, muitas vezes, são realizadas em função do teor de fósforo remanescente, pois dependem não somente do teor de argila, mas também do teor de matéria orgânica e da qualidade da argila (ALVAREZ *et al.*, 1999). Na Figura 12(v) é apresentado o mapa de variabilidade espacial do fósforo remanescente. Ao se comparar com o mapa de CE20, verifica-se que nas regiões que obtiveram valores abaixo da média de fósforo remanescente, também apresentaram valores de condutividade elétrica baixo. Por sua vez, em regiões que obtiveram valores de fósforo remanescente acima da média, também apresentaram valores mais elevados de condutividade elétrica. Esse fato pode ser confirmado por meio da observação do coeficiente de correlação determinado, que foi um dos mais altos obtidos no presente estudo, sendo superado somente pelo mapa de potássio. Esses resultados sugerem que em regiões onde o estudo foi realizado, a condutividade elétrica aparente do solo esteja intimamente ligada com o fósforo remanescente.

4.3 Zonas de manejo definidas com base em altitude e condutividade elétrica aparente do solo.

Na Figura 13 é apresentada a janela desenvolvida que cadastra os dados de coordenadas e variáveis para definição de zonas de manejo. Apesar do algoritmo *fuzzy k-means* não utilizar dados de coordenadas durante o processo de classificação, esses dados são utilizados na apresentação dos mapas classificados. Os dados utilizados para definir zonas de manejo são os mapas interpolados pela metodologia de krigagem, apresentados na Figura 12. O usuário deve definir o número de interações máximas, o número de zonas de manejo que se deseja dividir o conjunto de dados e o coeficiente *fuzzy*. Pode-se marcar o item *Normalizar dados*, caso se deseje que os dados sejam normalizados em média zero e desvio padrão um. Os dados classificados são

armazenados em dois arquivos, um no formato “cla” e outro no formato “info”. O primeiro arquivo armazena dados de coordenadas e a classificação das zonas para elaboração do mapa. O segundo arquivo armazena informações a respeito de dados iniciais, média e desvio padrão das variáveis, índices de performance da classificação e dados da matriz de pertinência.

Definir zonas de manejo

Dados para definição de zonas de manejo

Nº máximo de iterações Nº de zonas de manejo Coeficiente fuzzy

Normalizar dados

Índice de classificação

Fuzziness Perfomance Index (FPI) Normalised Classification Entropy (NCE)

Adicionar coordenadas... Adicionar variável... Remover variável...

	Coord X	Coord Y	Altitude	CEa 20	Cea 40	Classe		
1	752652.384	708148.426	910.168	2.273	1.522	2		
2	752652.384	708153.426	910.575	2.287	1.533	2		
3	752652.384	708158.426	911.079	2.303	1.544	2		
4	752652.384	708163.426	911.682	2.319	1.551	2		
5	752652.384	708168.426	912.383	2.334	1.556	2		
6	752652.384	708173.426	913.126	2.329	1.558	2		
7	752652.384	708178.426	913.898	2.344	1.562	2		
8	752652.384	708183.426	914.784	2.356	1.564	2		
9	752652.384	708188.426	915.78	2.365	1.566	2		
10	752652.384	708193.426	916.885	2.371	1.566	2		
11	752652.384	708198.426	918.162	2.35	1.548	2		
12	752652.384	708203.426	919.472	2.349	1.544	2		
13	752652.384	708208.426	920.876	2.346	1.539	2		
14	752652.384	708213.426	922.289	2.344	1.534	2		
15	752652.384	708218.426	923.869	2.341	1.542	2		
16	752652.384	708223.426	925.525	2.335	1.554	2		
17	752652.384	708228.426	927.249	2.328	1.563	2		

Calcular zonas de manejo... Salvar... Fechar

Figura 13. Janela do sistema de apoio à decisão para definição de zonas de manejo a partir dos mapas interpolados.

Nas Figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19 são apresentadas as zonas de manejo definidas a partir do mapa de altitude (ZMA), do mapa de CE20 (ZM20), do mapa de CE40 (ZM40), dos mapas de CE20 e altitude (ZM20A), dos mapas de CE40 e altitude (ZM40A) e dos mapas de CE20, CE40 e altitude (ZM2040A), respectivamente, classificadas em duas, três, quatro e cinco zonas. Nas Tabelas 4, 5, 6, 7, 8 e 9 são

apresentados os valores médios das variáveis em cada uma das zonas de manejo definidas.

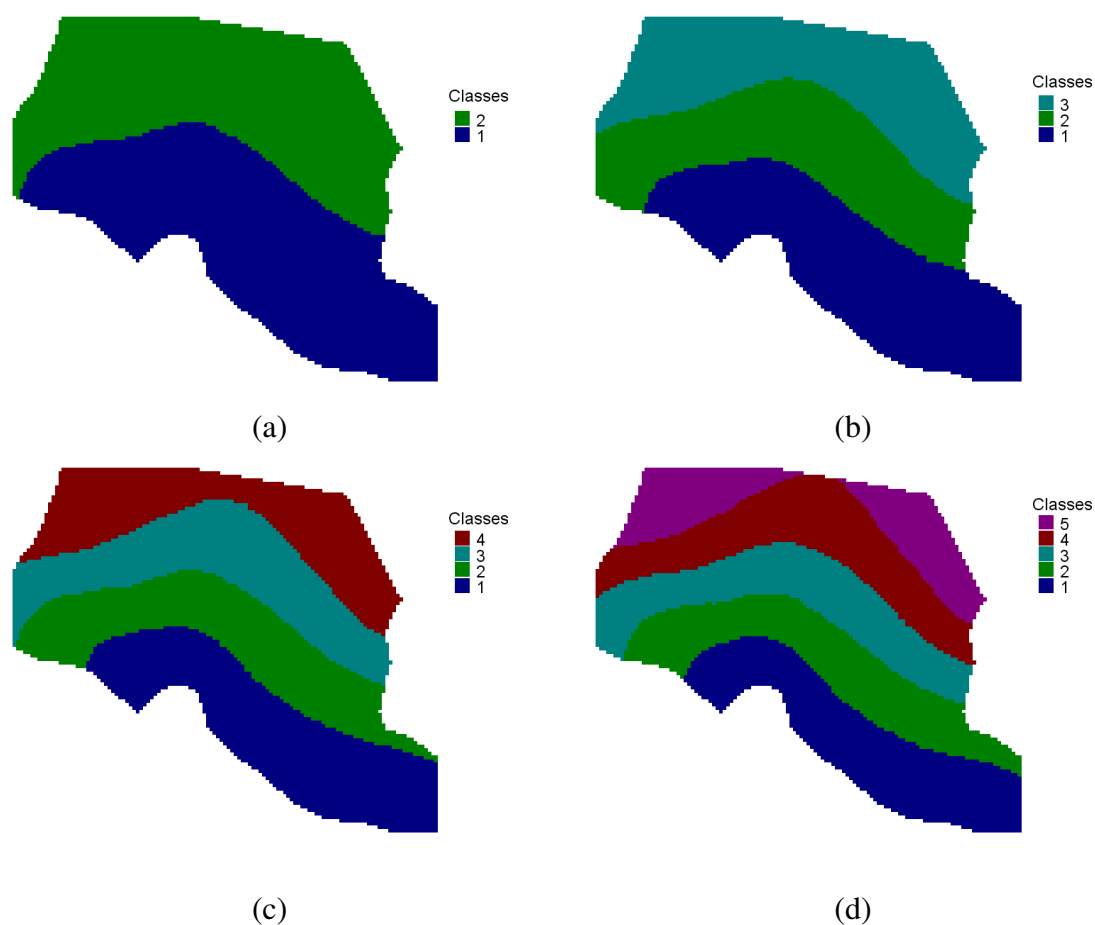


Figura 14. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir do mapa de variabilidade espacial da altitude (ZMA) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.

Tabela 4. Média e desvio padrão da altitude para cada uma das classes para a ZMA

ZMA	Classes	Altitude (m)	
		Média	Desvio padrão
2 classes	1	877,30	16,07
	2	938,46	17,68
3 classes	1	869,02	10,33
	2	908,95	11,80
	3	948,72	12,01
4 classes	1	864,75	7,51
	2	893,61	9,06
	3	925,28	8,99
	4	954,36	9,45
5 classes	1	862,13	5,76
	2	884,47	7,02
	3	910,39	7,50
	4	936,21	7,08
	5	959,10	7,57

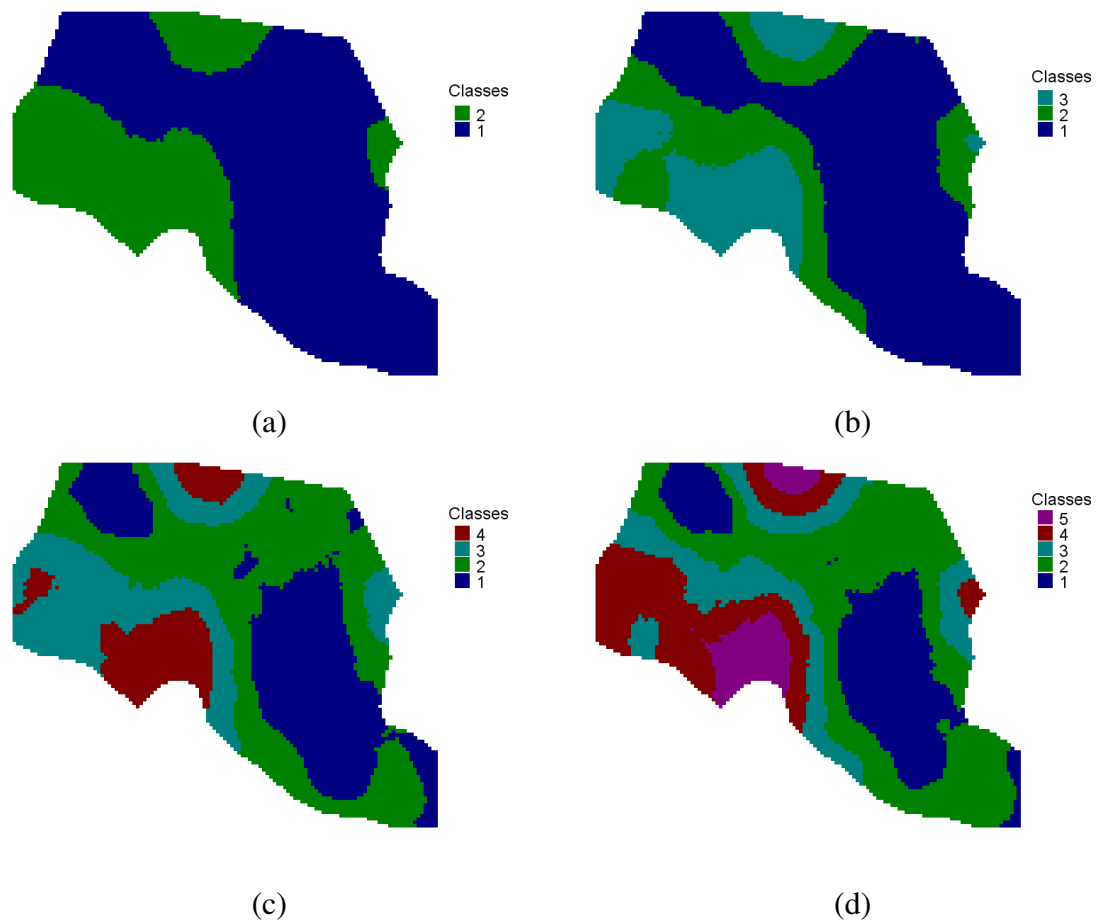


Figura 15. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir do mapa de variabilidade espacial da CE20 (ZM20) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.

Tabela 5. Média e desvio padrão da CE20 para cada uma das classes para a ZM20

ZM20	Classes	CE20 (mS m ⁻¹)	
		Média	Desvio padrão
2 classes	1	1,53	0,17
	2	2,30	0,26
3 classes	1	1,48	0,13
	2	1,94	0,15
	3	2,46	0,21
4 classes	1	1,37	0,09
	2	1,64	0,11
	3	2,13	0,14
	4	2,59	0,19
5 classes	1	1,34	0,08
	2	1,57	0,07
	3	1,90	0,11
	4	2,27	0,11
	5	2,71	0,16

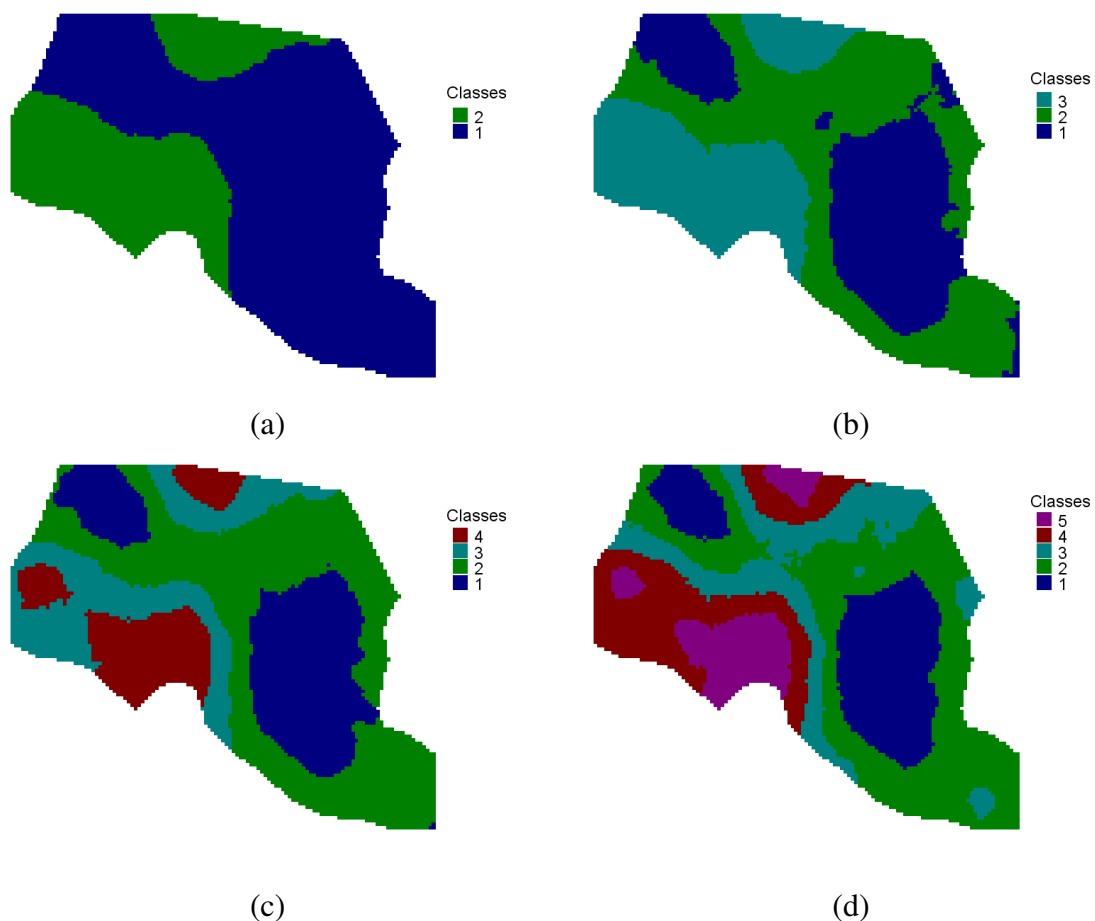


Figura 16. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir do mapa de variabilidade espacial da CE40 (ZM40) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.

Tabela 6. Média e desvio padrão da CE40 para cada uma das classes para a ZM40

ZM40	Classes	CE40 (mS m^{-1})	
		Média	Desvio padrão
2 classes	1	1,05	0,13
	2	1,57	0,16
3 classes	1	0,94	0,08
	2	1,17	0,09
	3	1,61	0,14
4 classes	1	0,92	0,07
	2	1,13	0,07
	3	1,45	0,09
	4	1,72	0,11
5 classes	1	0,89	0,05
	2	1,08	0,05
	3	1,25	0,06
	4	1,52	0,07
	5	1,76	0,11

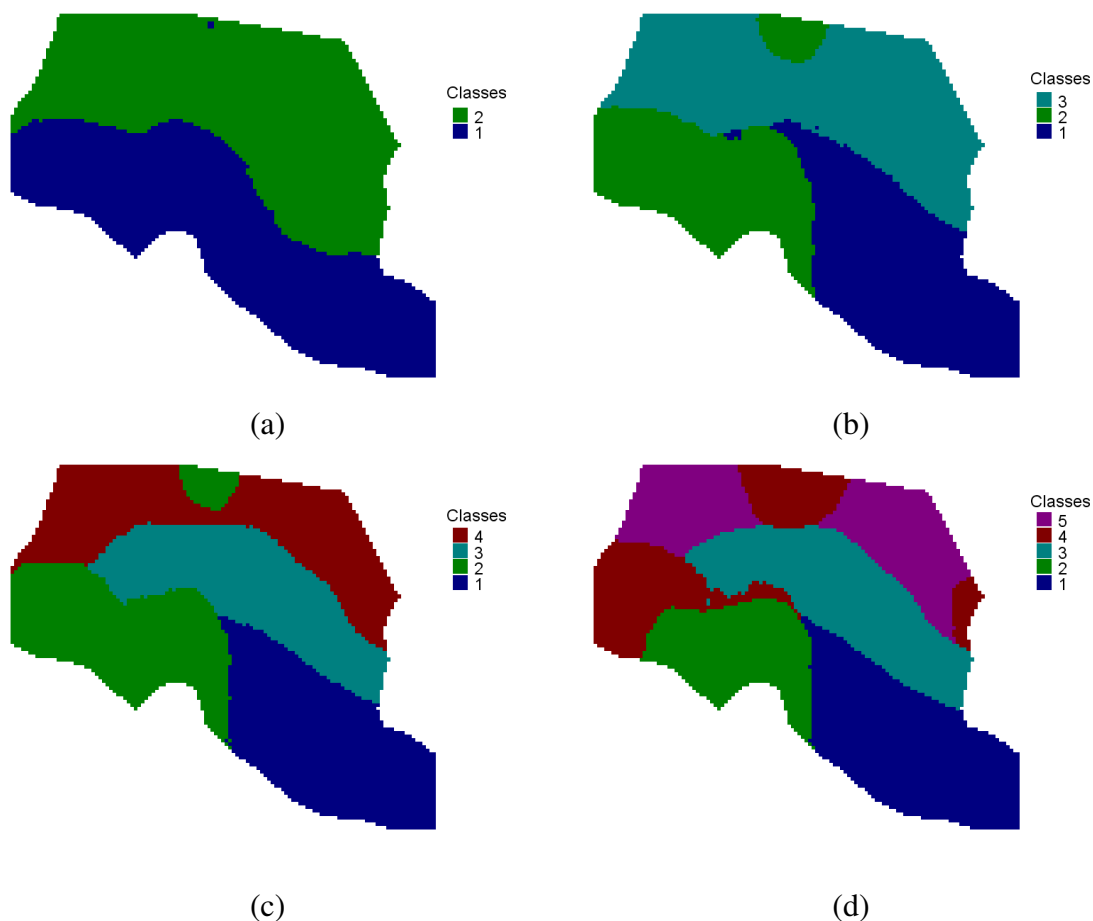


Figura 17. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas com o mapa de variabilidade espacial da CE20 e altitude (ZM20A) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.

Tabela 7. Média e desvio padrão da CE20 e altitude para cada uma das classes para a ZM20A.

ZM20A	Classes	Altitude (m)		CE20 (mS m ⁻¹)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
2 classes	1	876,95	17,77	1,91	0,46
	2	934,49	21,53	1,65	0,32
3 classes	1	877,03	17,11	1,48	0,16
	2	891,89	26,29	2,34	0,26
	3	940,69	17,40	1,64	0,24
4 classes	1	871,02	12,55	1,49	0,16
	2	889,66	25,55	2,37	0,25
	3	916,86	11,38	1,57	0,19
	4	951,63	11,24	1,71	0,28
5 classes	1	869,68	11,46	1,50	0,16
	2	872,13	11,17	2,43	0,27
	3	914,72	11,53	1,54	0,18
	4	924,70	20,28	2,20	0,20
	5	953,21	11,16	1,58	0,18

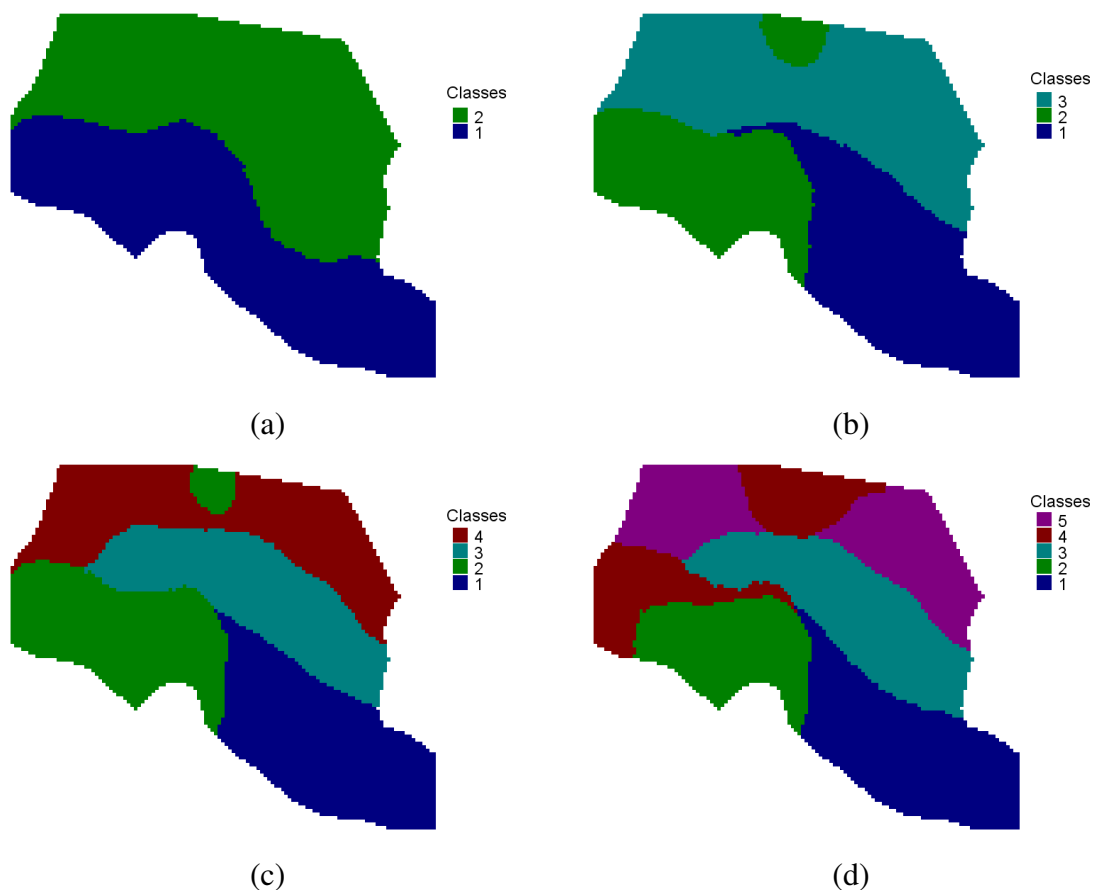


Figura 18. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas com o mapa de variabilidade espacial da CE40 e altitude (ZM40A) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.

Tabela 8. Média e desvio padrão da CE40 e altitude para cada uma das classes para a ZM40A.

ZM40A	Classes	Altitude (m)		CE40 (mS m^{-1})	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
2 classes	1	876,82	18,12	1,33	0,30
	2	933,22	22,66	1,11	0,21
3 classes	1	876,94	17,21	1,03	0,12
	2	892,26	26,14	1,60	0,15
	3	940,71	17,39	1,12	0,16
4 classes	1	870,07	11,94	1,04	0,12
	2	889,78	24,64	1,62	0,15
	3	916,36	11,71	1,05	0,14
	4	951,37	11,40	1,17	0,19
5 classes	1	867,87	10,31	1,06	0,11
	2	874,39	12,13	1,65	0,16
	3	911,69	12,48	1,02	0,14
	4	925,94	18,21	1,49	0,12
	5	952,31	11,80	1,08	0,12

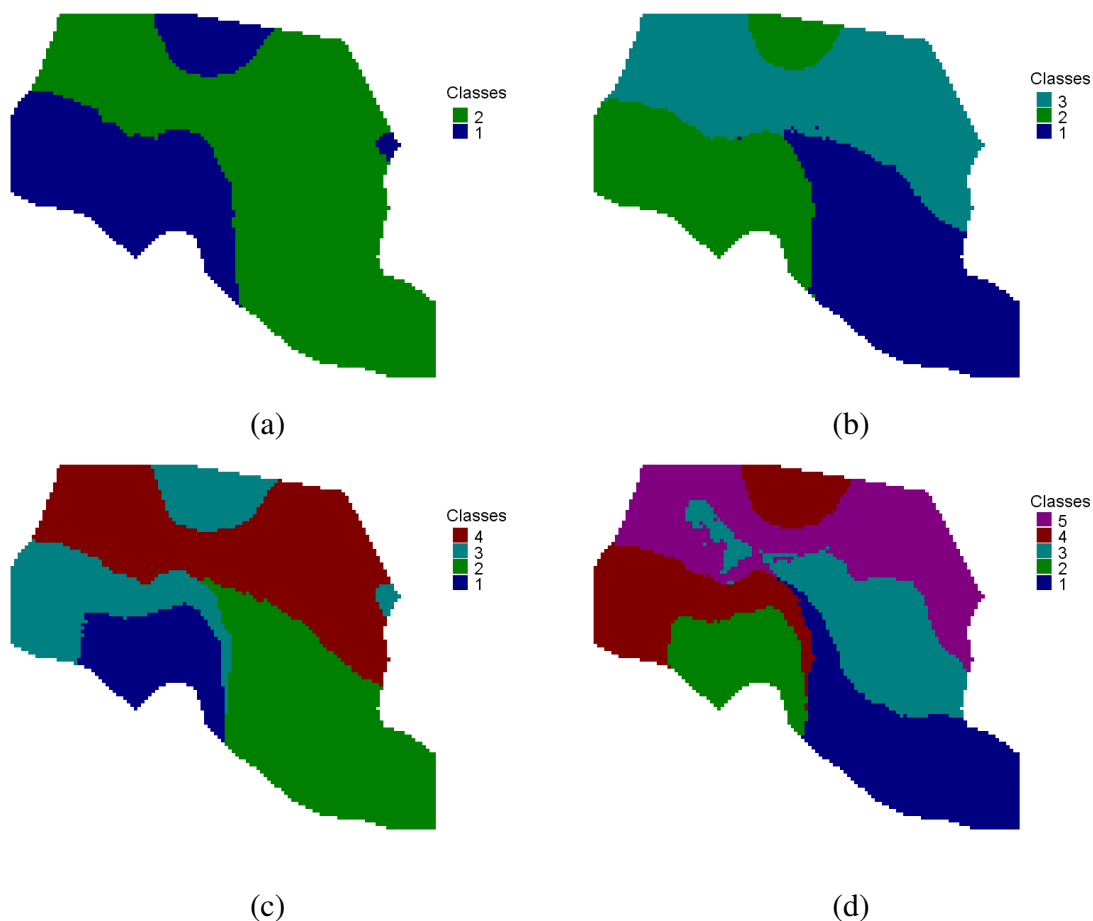


Figura 19. Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas com o mapa de variabilidade espacial da altitude, CE20 e CE40 (ZM2040A) em (a) duas classes, (b) três classes, (c) quatro classes e (d) cinco classes.

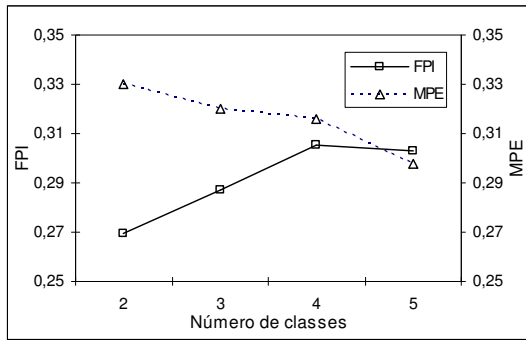
Tabela 9. Média e desvio padrão da CE20, CE40 e altitude para cada uma das classes para a ZM2040A.

ZM2040A	Classes	Altitude (m)		CE20 (mS m ⁻¹)		CE40 (mS m ⁻¹)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
2 classes	1	898,05	30,35	2,30	0,26	1,56	0,17
	2	910,97	36,11	1,54	0,18	1,05	0,13
3 classes	1	877,36	17,61	1,48	0,16	1,02	0,12
	2	894,87	28,23	2,34	0,25	1,60	0,15
	3	940,35	18,12	1,63	0,21	1,11	0,14
4 classes	1	869,66	9,85	2,50	0,24	1,70	0,15
	2	876,17	16,80	1,48	0,16	1,02	0,12
	3	917,70	22,88	2,16	0,20	1,47	0,12
	4	940,47	18,33	1,58	0,18	1,08	0,13
5 classes	1	867,35	10,54	1,54	0,16	1,07	0,10
	2	868,71	9,18	2,53	0,23	1,71	0,14
	3	909,58	16,53	1,40	0,14	0,95	0,11
	4	914,52	22,26	2,18	0,19	1,50	0,11
	5	946,56	15,98	1,64	0,19	1,12	0,12

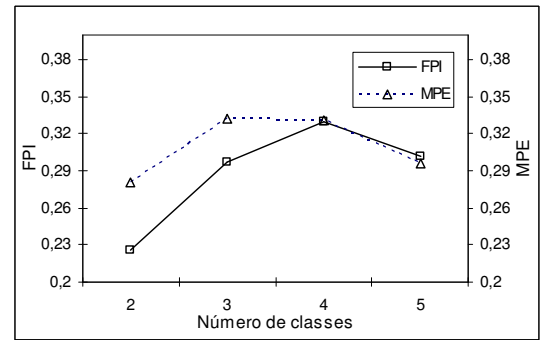
Ao analisar as zonas de manejo definidas por uma única variável, é possível perceber que à medida que se aumenta o número de classes de duas para cinco, o mapa de zona de manejo resultante aproxima-se do mapa de variabilidade espacial da variável de origem. Essa é uma característica do algoritmo *fuzzy k-means* retratado por Pedroso *et al.* (2010), que compararam algumas metodologias para definir zonas de manejo. Dessa forma, a classificação dependerá da qualidade do mapa de variabilidade espacial. Esse fato pode ser verificado quando se analisa a ZM20 em relação a ZM40. O mapa ZM20 apresenta classes mais dispersas que o mapa ZM40, devido à menor qualidade do mapa de variabilidade espacial de CE20 em relação à CE40, retratado pelo Índice de Dependência Espacial de ambos os mapas. Segundo Tisseyre e McBratney (2008), pequenas zonas de manejo são impossíveis de serem manejadas devido a limitações técnicas e econômicas. Quando se aumenta o número de classes, alguns pixels do mapa permanecem inalterados, enquanto que outros são reclassificados. Isso ocorre porque esses pixels apresentam fraca proximidade euclidiana com as classes alocadas e a classificação independe das coordenadas das variáveis. Pedroso *et al.* (2010) destaca como fator limitante do algoritmo *fuzzy k-means*, a desconsideração das coordenadas das variáveis durante o processo de classificação. Essa característica do algoritmo *fuzzy k-means* poderia, em parte, ser solucionada utilizando-se um algoritmo de segmentação de imagem, não muito usual para definir zonas de manejo, conforme proposto por Petroso *et al.* (2010). Além disso, independente do número de classes, a proporção em termos de áreas para cada classe depende da distribuição de frequência da variável no campo. Esse fato pode ser visualizado na Figura 15(a), classificado em duas zonas de manejo, nas quais a área da classe 1 é maior que a área da classe 2. Essa característica poderá ser modificada quando se utiliza mais de uma variável para definir as zonas de manejo, gerando, dessa forma, classes mais contínuas e com maiores áreas.

Em uma classificação deve-se, inicialmente, definir o número de classes que se deseja dividir o conjunto de dados. Deve-se avaliar se o número de classes encontradas é realmente o número ideal em cada problema proposto e se as classes definidas são técnica e economicamente viáveis. Segundo Fridgen *et al.* (2004), número ótimo de classes para cada zona de manejo pode ser determinado quando se encontra o mínimo valor do Índice de Performance Fuzzy (FPI – “Fuzziness Performace Índice”) e Entropia da Partição Modificada (MPE – “Modified Partition Entropy”). Os resultados gráficos dos dois índices para as zonas de manejo definidas estão apresentados na Figura 20. Para a ZMA, verifica-se que houve um valor mínimo de FPI em duas classes e mínimo

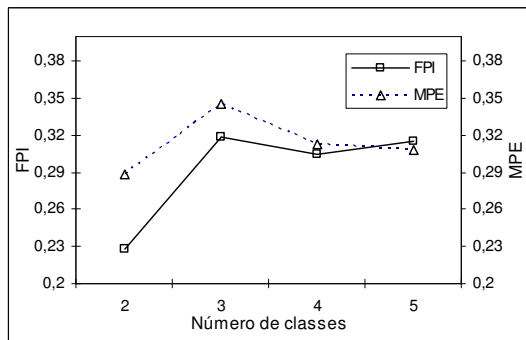
para MPE para cinco classes. Nesse caso, quando os índices não coincidem em um número único de classes, a decisão final de quantas classes existem depende de uma análise adicional. Por exemplo, verificar se um aumento no número de classes, em zonas de manejo definidas com uma ou mais variáveis, resulta em produtividade entre classes significativamente diferentes. Além disso, pode-se comparar zonas de manejo definidas com diferentes variáveis de entrada para determinar quais são as mais importantes (FRIDGEN *et al.*, 2004). Para a ZM20 e ZM40, o mínimo valor de FPI e MPE foi determinado para duas classes. Para ZM20A, ZM40A e ZM2040A, o valor mínimo de FPI e MPE foi para três classes. Molin e Castro (2008), Yan *et al.* (2008), Xin-Zhong *et al.* (2009), Morari *et al.* (2009), em estudos semelhantes, obtiveram um valor ótimo de número de classes igual a três. Dessa forma, no presente trabalho, recomenda-se a utilização de três classes para definir as zonas de manejo.



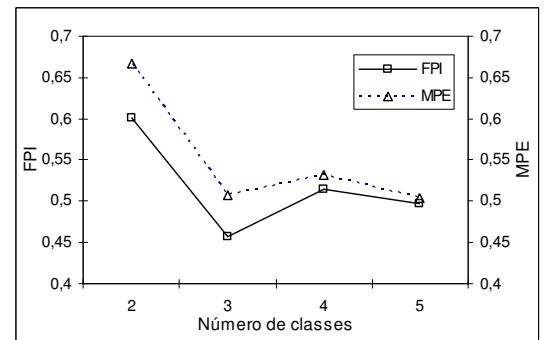
(a)



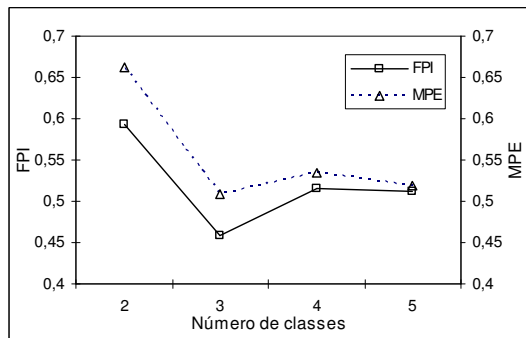
(b)



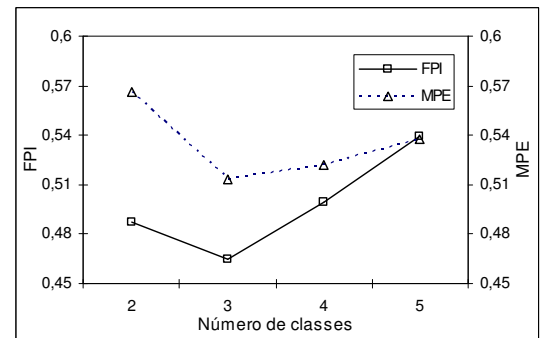
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 20. Índice de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia da Classificação Normalizada (NCE) calculados para as zonas de manejo (a) ZMA, (b) ZM20, (c) ZM40, (d) ZM20A, (e) ZM40A e (f) ZM2040A.

4.4 Avaliações da concordância entre as zonas de manejo e as propriedades do solo

Para se comparar quais variáveis de entrada foram as mais importantes para se definir as zonas de manejo, foram realizadas as análises de concordâncias, apresentadas na Tabela 10. Para isso, utilizou-se a ZMA, ZM20, ZM40, ZM20A, ZM40A e ZM2040A apresentadas nas Figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19, respectivamente, em relação às propriedades do solo classificadas em três classes, conforme apresentado no Apêndice D.

Tabela 10. Coeficiente Kappa para as classificações das propriedades do solo com as zonas de manejo em três classes.

Propriedades do solo	Zonas de manejo					
	ZMA	ZM20	ZM40	ZM20A	ZM40A	ZM2040A
1 Argila	0,18 ^A	0,13 ^B	0,16 ^A	0,16 ^A	0,17 ^A	0,18 ^A
2 CTC Efetiva	0,21 ^A	0,28 ^B	0,19 ^A	0,35 ^C	0,36 ^C	0,36 ^C
3 CTC a pH 7	0,20 ^A	0,11 ^B	0,09 ^B	0,22 ^A	0,22 ^A	0,20 ^A
4 Potássio	0,17 ^A	0,38 ^B	0,39 ^B	0,45 ^C	0,44 ^C	0,46 ^C
5 Matéria Orgânica	0,18 ^A	0,07 ^B	0,09 ^B	0,13 ^C	0,13 ^C	0,14 ^C
6 Fósforo	0,23 ^A	0,12 ^B	0,13 ^B	0,29 ^C	0,29 ^C	0,27 ^C
7 Fósforo Remanescente	0,26 ^A	0,15 ^B	0,25 ^A	0,49 ^C	0,48 ^C	0,49 ^C
8 pH	0,30 ^A	0,09 ^B	0,11 ^B	0,26 ^C	0,26 ^C	0,26 ^C
9 Cobre	0,38 ^A	0,10 ^B	0,16 ^B	0,53 ^C	0,52 ^C	0,52 ^C
10 Ferro	0,27 ^A	0,00*	0,13 ^B	0,42 ^C	0,42 ^C	0,39 ^D
11 Cálcio	0,20 ^A	0,13 ^B	0,12 ^B	0,25 ^C	0,26 ^C	0,27 ^C
12 Magnésio	0,39 ^A	0,16 ^B	0,13 ^C	0,39 ^A	0,39 ^A	0,37 ^A
13 Acidez Trocável	0,37 ^A	0,07 ^B	0,14 ^C	0,43 ^D	0,43 ^D	0,41 ^D
14 Acidez Potencial	0,30 ^A	0,05 ^B	0,15 ^C	0,18 ^D	0,17 ^C	0,16 ^C
15 Soma de Bases	0,24 ^A	0,22 ^A	0,15 ^B	0,33 ^C	0,33 ^C	0,33 ^C
16 Saturação por Bases	0,37 ^A	0,03 ^B	0,07 ^C	0,21 ^D	0,21 ^D	0,20 ^D
17 Saturação por Alumínio	0,28 ^A	0,21 ^B	0,17 ^C	0,49 ^D	0,49 ^D	0,48 ^D
18 Zinco	0,52 ^A	0,19 ^B	0,22 ^C	0,48 ^D	0,47 ^D	0,45 ^E
19 Manganês	0,21 ^A	0,28 ^B	0,17 ^C	0,38 ^D	0,37 ^D	0,36 ^D
20 Areia Grossa	0,31 ^A	0,06 ^B	0,11 ^C	0,30 ^A	0,29 ^A	0,29 ^A
21 Areia Fina	0,21 ^A	0,01*	0,09 ^B	0,14 ^C	0,10 ^B	0,15 ^C
22 Silte	0,38 ^A	0,19 ^B	0,26 ^C	0,49 ^D	0,50 ^D	0,48 ^D

Obs: * Não significativo ao nível de 5% de probabilidade; ^{A, B, C, D e E} letras iguais em colunas diferentes em uma mesma linha indicam que os valores são iguais entre zonas de manejo, ao nível de 5% de probabilidade.

Pela análise da Tabela 10 é possível verificar que a ZMA apresentou um coeficiente Kappa significativamente superior às demais zonas de manejo, na classificação do zinco, saturação por bases, pH, matéria orgânica, acidez potencial, e areia fina. Para as demais propriedades do solo, os valores mais elevados de coeficiente Kappa foram obtidos utilizando-se a ZM20A e ZM40A. O coeficiente Kappa da ZM20A e ZM40A foi estatisticamente igual entre si, para todas as propriedades do solo. A ZM20A, ZM40A e ZM2040A não apresentaram nenhum valor de coeficiente Kappa inferior às outras zonas de manejo. A ZM2040A não apresentou nenhum coeficiente Kappa estatisticamente superior às outras zonas de manejo. Dessa forma, observou-se que a ZM20A e ZM40A apresentaram, no geral, os melhores resultados na classificação das propriedades do solo. Dessa forma, as variáveis recomendadas para definir as zonas de manejo, na área estudada, é a altitude e CE20 ou altitude e CE40, não havendo melhoria significativa nos resultados ao se realizar medições de condutividade elétrica aparente do solo em ambas as profundidades.

O mapa de argila não foi bem classificado pelas zonas de manejo definidas, onde observou-se um coeficiente Kappa máximo de 0,18. No entanto, o mapa de fósforo remanescente foi bem classificado pela ZM20A com coeficiente Kappa de 0,49. O fósforo remanescente é um importante parâmetro para recomendação de corretivos e fertilizantes (ALVAREZ *et al.*, 1999). Com relação aos macronutrientes, potássio e fósforo, os valores mais elevados de coeficientes Kappa foram, respectivamente, de 0,46 e 0,29, utilizando-se a ZM20A. Alguns autores (CARVALHO *et al.*, 1994; SILVA *et al.*, 2002a; SILVA *et al.*, 2002b) destacaram a importância do potássio para a qualidade de bebida do café. Dessa forma, a condutividade elétrica aparente do solo poderá se tornar útil na identificação de áreas de café com maior potencial qualitativo. Além disso, poderá definir zonas de manejo para recomendar doses ideais de potássio para obter café de qualidade de bebida superior. Os micronutrientes, zinco, cobre, ferro e manganês apresentam coeficiente Kappa superior a 0,38, utilizando-se a ZM20A. Kitchen *et al.* (2005) obtiveram coeficientes Kappa mais elevados de 0,25 e 0,43 em dois campos de produção. Esses resultados foram obtidos utilizando-se três variáveis para definir zonas de manejo. Quando definiram zonas de manejo utilizando altitude e condutividade elétrica aparente do solo em uma profundidade, obtiveram coeficientes Kappa de 0,24 e 0,36. Os resultados obtidos pelos autores e no presente trabalho sugerem que a definição de zonas de manejo, utilizando-se diferentes variáveis em conjunto, apresente resultados mais satisfatórios na classificação do solo para recomendação de corretivos e fertilizantes. Além disso, as zonas de manejo definidas, utilizando-se a condutividade elétrica aparente do solo em conjunto com a altitude, apresentaram, no geral, melhores resultados na classificação das propriedades do solo.

5 CONCLUSÕES

O sistema de apoio à decisão desenvolvido gerou – pela metodologia de krigagem ordinária pontual – os mapas de variabilidade espacial de todas as variáveis nele inseridas. As interfaces gráficas desenvolvidas para comunicação com o usuário permitiram a modelagem dos semivariogramas teóricos automaticamente. Os mapas foram interpolados com grade regular em tamanho de cinco metros, no entanto, configurações de tamanhos diferentes podem ser utilizadas.

O algoritmo *fuzzy k-means* implementado no sistema de apoio à decisão definiu as zonas de manejo com até três mapas interpolados, simultaneamente, com duas a cinco classes. No entanto, mais de cinco classes e três mapas interpolados podem ser inseridos no sistema. As zonas de manejo são geradas automaticamente. Para isso, foi desenvolvida uma interface gráfica que permite ao usuário inserir os mapas interpolados e os dados de entrada do algoritmo *fuzzy k-means*.

A grade amostral realizada na área foi suficiente para detectar a dependência espacial das variáveis obtidas no campo. O menor valor de alcance determinado foi para o Ca^{2+} com valor de 49,64m, sendo que, para a condutividade elétrica aparente do solo, foi de 230,25 e 177,22m, respectivamente, para as profundidades de 0,20 e 0,40m. A condutividade elétrica aparente do solo apresentou índice de dependência espacial da ordem de 45,8% e 52,20%, respectivamente para as profundidades de 0,20 e 0,40 m.

Os mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo para as profundidades de 0,20m (CE20) e 0,40m(CE40) apresentaram coeficiente de correlação entre si da ordem de 0,9685.

Os dados de CE20 e CE40 apresentaram baixa correlação com as propriedades do solo. Não se observou correlação com o teor de argila. No entanto, o maior coeficiente de correlação determinado, apesar de baixo, foi com relação ao fósforo remanescente com valor da ordem de 0,427 e 0,465 para a CE20 e CE40, respectivamente.

Pelos índices de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia da Partição Modificada (MPE) determinou-se que o número ideal de classes – para as zonas de manejo definidas com o mapa de altitude em conjunto com o mapa de condutividade elétrica aparente do solo – foi igual a três classes.

As zonas de manejo que melhor classificaram as propriedades do solo foram as definidas com o mapa de altitude em conjunto com o mapa de CE20 (ZM20A). As propriedades do solo que merecem destaque na classificação da ZM20A são o fósforo remanescente e potássio, com coeficiente Kappa determinados de 0,49 e 0,45, respectivamente. Não se verificou ganhos estatisticamente significativos na qualidade da classificação das propriedades do solo quando se utilizou o mapa de CE40 para definir as zonas de manejo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS

AFONSO, P. C. JR.; CORREA, P. C.; GONELI, A. L. D.; SILVA, F. S. Contribuição das etapas do pré-processamento para a qualidade do café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-Especial Café, MG, n.8, p.46-53. 2004.

AIMRUN, W.; AMIN, M. S. M.; AHMAD, D.; HANAFI, M. M.; CHAN, C. S. Spatial variability of bulk soil electrical conductivity in a Malaysian paddy field: key to soil management. **Paddy Water Environ**, v.5, p.113-121, 2007.

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. e ALVAREZ V. V. H.(Ed.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, p.25-32, 1999.

ALVES, E. A. **Análise da variabilidade espacial da qualidade do café cereja produzido em região de montanha**. 2005. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

ALVES, E. A. **Variabilidade espacial e temporal da qualidade do café cereja produzido na região das Serras de Minas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

ALVES, H. M. R.; BERNARDES, T.; SILVEIRA, M. A.; NICOLELLA, G.; VIEIRA, T. G. C. Delimitação de um território potencial para a produção de cafés de qualidade diferenciada nos municípios de Campestre, Machado e Poço Fundo, MG. **Anais do V Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, Águas de Lindóia, SP, 2007.

ANSELIN, L.; BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. A Spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. **American Journal of Agricultural Economics**, v.86, n.3, p.675-687. 2004.

AVANTS, B.; SOODAK, D.; RUPPEINER, G. Measuring the electrical conductivity of the earth. American Association of Physics Teachers. **American Journal of Physics**, v.67, n.7, p.593-598, 1999.

BEKELE, A.; HUDNALL, W. H.; DAIGLE, J. J.; PRUDENTE, J. A.; WOLCOTT, M. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties. **Journal of Terramechanics**, v.42, p.339-351, 2005.

BOOLTINK, H. W.G.; ALPHEN, B. J.; BATCHELOR, W.D.; PAZ, J. O.; STOORVOGEL, J. J. VARGAS, R. Tools for optimizing management of spatially-variable fields. **Agricultural Systems**, v.70, p.445-476. 2001.

CAMBOURIS, A. N.; NOLIN, M. C.; ZEBARTH, B. J.; LAVERDISRE, M. R. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. **American Journal of Potato Research**, v.83, p.381-395, 2006.

CAROLL, Z. L.; OLIVER, M. A. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. **Geoderma**, v.128, p.354-374, 2005.

CARVALHO, V. D.; CHAGAS, S. J. R.; CHALFOUN, S. M.; BOTREL, N.; JUSTE JR., E. S. G. Relação entre a composição físico-química dos grãos beneficiado e a qualidade de bebida do café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, n.3, p.449-454, 1994.

CHALFOUN, S. M.; CARVALHO, V. D. de. A influência da altitude é um fator determinante sobre a qualidade da bebida de café. **Revista Cultivar**, n. 29, p. 33-34, maio 2001.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, n.6, p.1161-1164, 2003.

CONAB (2009). **Armazenagem**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A review of discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.24, p.169-174, 1986.

CORRÊA, J. B.; REIS JR., R. A.; CARVALHO, J. G.; GUIMARÃES, P. T. G. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiro do sul de Minas Gerais. **Ciência Agrotecnologia**, v.25, n.6, p.1279-1286, 2001.

CORWIN, D. L.; HENDRICKX, J. M. H. Electrical resistivity: Wenner Array. In: SILVA, J.S. **Methods of soil analysis part 4 physical methods**. Madison, Wisconsin, USA: SSSA Book Series, n.5, p.1282-1287, 2002.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity Part II. Case study. **Computer and Electronics in Agriculture**, v.46, p.135-152, 2005b.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; OSTER, J. D.; KAFFKA, S.R. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. **Geoderma**, v.131, p.369–387, 2006.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; SOPPE, R.; AYARS, J. E. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, v.95, p.352-364, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agricultural. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.46, p.11-43, 2005a.

CORWIN, D. L.; S. M. LESCH. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v.95, n.3, p.471-471, 2003.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M.; SHOUSE, P.J.; SOPPE, R.; AYARS, J.E. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, v.95, n.2, p.352-364, 2003b.

DIAS, L. F. L. **Avaliação de algumas propriedades físicas de grãos de café (Coffea arábica) orgânico e convencional**. Marechal Cândido Rondon: UNIOESTE, 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, PR, 2007.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ V., V. H., KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados em latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1785-1791, 2008.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulométrica e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 1009-1016, 2008.

FAULIN, G. D. C.; MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo. **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Canoas, RS, 2005.

FLEMING, K. L.; HEERMANN, D. F.; WESTFALL, D. G. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. **Agronomy Journal**, v.96, p.1581-1587, 2004.

GRUIJTER, J. J.; MCBRATNEY, A. B. **A Modified fuzzy k-means method for predictive classification**. Conference of the International Federation of Classification Societies, p. 97-104, 1988.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, Inc, New York, NY, 1989.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computer and Electronics in Agriculture**, v.46, p.285-308, 2005.

LESCH, S. M.; CORWIN, D. L.; ROBINSON, D. A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. **Computer and Electronics in Agriculture**, v.46, p.351-378, 2005.

LOURAKIS, M. I. A. A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm implemented by levmar. Foundation for Reserch and Technology – Hellas (FORTH). 2005. Disponível em: <<http://www.ics.forth.gr>>. Acesso em: 15 jul. 2009.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, B. E. M.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.1023-1031, 2006.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MCBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v.6, p.7-23, 2005.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **FuzMe Version 3**. Australian centre for precision agriculture. The University of Sydney, NSW, 2006. Disponível em: <<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>>. Acesso em: 29 set. 2008.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v.65, n.6, p.567-573, 2008.

MORARI, F.; CASTRIGNANÒ, A.; PAGLIARIN, C. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.68, p.97-107, 2009.

OLIVEIRA, R. B.; SILVA, S. A.; SOUZA, G. S.; PASSOS, R. R.; PREZOTTI, L. C.; LIMA, J. S. S. Análise espacial de variáveis indicadoras de fertilidade do solo sob cultivo do cafeeiro conilon. **X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**, 2006.

ORTEGA, R. A.; SANTIBÁÑEZ, O. A. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v.58, p.49-59, 2007.

PEDROSO, M.; TAYLOR, J.; TISSEYRE, B.; CHARNOMORDIC, B.; GUILLAUME, S. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.70, p.199-208, 2010.

PINTO, F. A. C.; ALVES, E. A.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; ABRAHÃO, S. A. Orientação da face de exposição ao sol de parcelas de cafeeiros produzidos em região de montanha e seu efeito na qualidade de bebida. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.9, p.32-39, 2006.

PONZONI, F. J.; ALMEIDA, E. S. A Estimativa do Parâmetro Kappa (K) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Salvador, BA, p.729-733, 1996.

QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; ZANDONADI, R. S.; EMERICH, I. N.; SENA JUNIOR, D. G. Uso de técnicas de agricultura de precisão para a cafeicultura de montanha. In: ZAMBOLIM L. (Ed.) **Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café**. Viçosa, MG, p.77-108, 2004.

REIS, L. R.; VIEIRA, L. B.; MANTOVANI, E. C.; SANTOS, N. T.; QUEIROZ, D. M. Estudo da correlação da condutividade elétrica em um latossolo amarelo escuro com propriedades químicas do solo. **Engenharia na Agricultura**, v.17, p.227-232, 2009.

RICHARDS, L. Physical conditions of water in water retentivity of soil at specific volume of matrix suction. In: BLACK, C.; ESMINGER, L.E. **Methods of soil analysis**. Madison, Am. Soc. Agron, 98, p.131-137, 1965.

RODRIGUES JR., F. A. **Geração de zonas de manejo para cafeicultura com base em determinações usando sensor SPAD e análise foliar**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

RODRIGUES, L. B.; VIEIRA, F. B. P.; AGUSTINI, E. O método húngaro de otimização para o problema da alocação de tarefas. **FAMAT em Revista**, n.4, p.25-39, 2005.

SAEY, T.; VAN MEIRVENNE, M.; VERMEERSCH, H.; AMELOOT, N.; COCKX, L. A Pedotransfer function to evaluate the soil profile textural heterogeneity using proximally sensed apparent electrical conductivity. **Geoderma**, v.150, p.389-395, 2009.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Qualidade de grãos de café beneficiados em resposta à adubação potássica. **Scientia Agrícola**, v.59, n.1, p.173-179, 2002a.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Qualidade dos grãos de café em função de doses de potássio. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.24, n.5, p.1291-1297, 2002b.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G.; CHARGAS, S. J. R.; COSTA, L. Fontes e doses de potássio na produção e qualidade do grão de café beneficiado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.3, p.335-345, 1999.

SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; VIEIRA, L. H. S.; OLIVEIRA, E. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência Agrotecnologia**, v.32, n.1, p.231-241, 2008.

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v.10, p.471-487, 2009.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.975-983, 2006.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; WIEBOLD, W.J.; BATCHELOR, W.D.; BOLLEROD, G.A.; BULLOCK, D.G.; CLAY, D.E.; PALM, H.L.; PIERCE, F.J.; SCHULER, R.T.; THELEN, K.D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, p.263-283, 2005.

TISSEYRE, B.; MCBRATNEY, A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture. **Precision Agriculture**, v.9, n.1-2, p.101–113, 2008.

VALCKX, J.; COCKX, L.; WAUTERS, J.; Van MEIRVENNE, M.; GEVERS, G.; HERMY, M.; MUYS, B. Within-field spatial distribution of earthworm populations related to species interactions and soil apparent electrical conductivity. **Applied Soil Ecology**, v.41, p.315-328, 2009.

VITHARANA, U. W. A.; MEIRVENNE, M. V.; SIMPSON, D.; COCKX, L.; BAERDEMAEKER, J. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. **Geoderma**, v.143, p.206-215, 2008.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B. The ‘‘null hypothesis’’ of precision agriculture management. **Precision Agriculture**, v.2, p.265-279. 2001.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. **Definition and interpretation of potential management zones in Australia**. 11th Australian Agronomy Conference, 2003.

XIN-ZHONG, W.; GUO-SHUNA, L.; HONG-CHAO, H.; ZHEN-HAIB, W.; QING-HUAB, L.; XU-FENG, L.; WEI-HONG, H.; YAN-TAOC, L. Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.65, p.168-175, 2009.

YAN, L.; ZHOU, S.; CI-FANG, W.; FANG, L., HONG-YI, L. Optimised spatial sampling scheme for soil electrical conductivity based on variance quad-tree (VQT) method. **Agricultural Sciences in China**. v.6, n.12, p.1463-1471, 2007b.

YAN, L.; ZHOU, S.; CI-FANG, W.; HONG-YI, L.; FANG, L. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. **Journal of Zhejiang University Science B**, v.9, n.1, p.68-76, 2008.

YAN, L.; ZHOU, S.; FENG, L. Delineation of site-specific management zones based on temporal and spatial variability of soil electrical conductivity. **Soil Science Society of China**. Pedosphere, v.17, n.2, p.156-164, 2007a.

YAN, L.; ZHOU, S.; FENG, L. HONG-YI, L. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.56, p.174-186, 2007c.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e ftopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2001.

Apêndices

Apêndice A

Curva de Retenção de Água no Solo

Tabela 1A. Curva de retenção de água no solo

Amostras de solo	Umidade atual do solo (kg kg ⁻¹)	Potencial kPa				
		-10	-30	-100	-500	-1500
Umidade (kg kg ⁻¹)						
1	0,344	0,367	0,331	0,306	0,278	0,241
2	0,337	0,312	0,293	0,268	0,240	0,229
3	0,357	0,327	0,301	0,276	0,248	0,226
4	0,285	0,267	0,245	0,220	0,192	0,176
5	0,358	0,355	0,332	0,307	0,279	0,235
6	0,314	0,323	0,304	0,279	0,251	0,229
7	0,327	0,318	0,296	0,271	0,243	0,225
8	0,362	0,332	0,316	0,291	0,263	0,242
9	0,329	0,320	0,294	0,269	0,241	0,228
10	0,417	0,376	0,334	0,309	0,281	0,257
11	0,294	0,306	0,279	0,254	0,226	0,201
12	0,281	0,273	0,255	0,230	0,202	0,175
13	0,315	0,354	0,311	0,286	0,258	0,228
14	0,313	0,305	0,270	0,245	0,217	0,189
15	0,258	0,275	0,244	0,219	0,191	0,173

Apêndice B

Semivariogramas das propriedades do solo

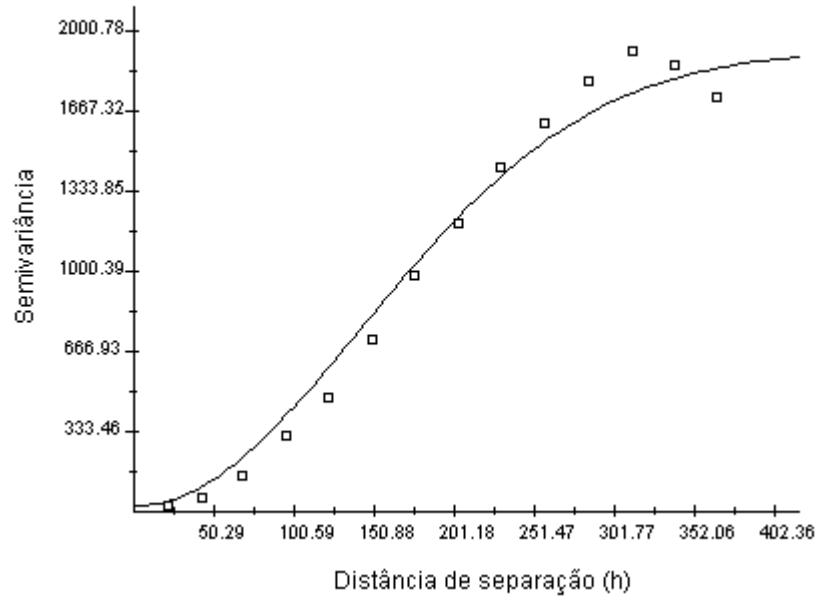


Figura 1B. Semivariograma teórico ajustado para a altitude da área de produção de café.

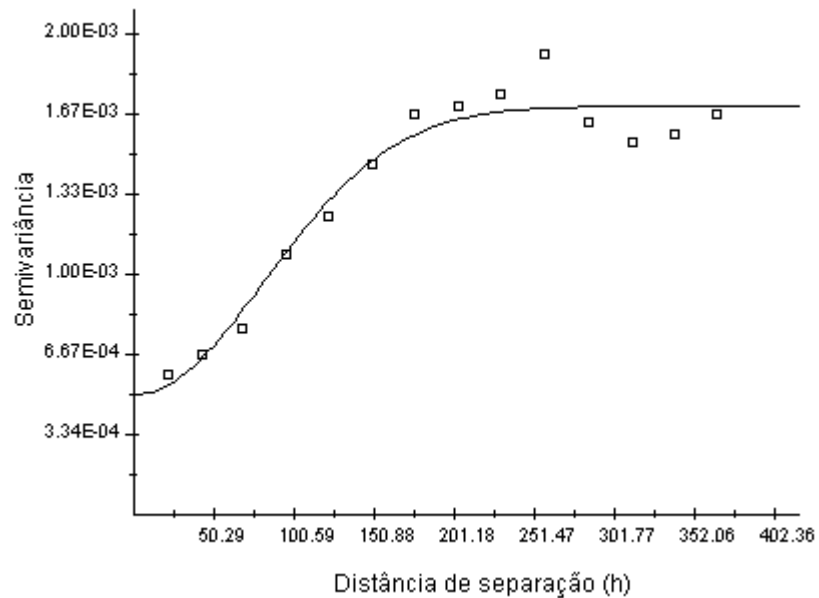


Figura 2B. Semivariograma teórico ajustado para a umidade atual do solo.

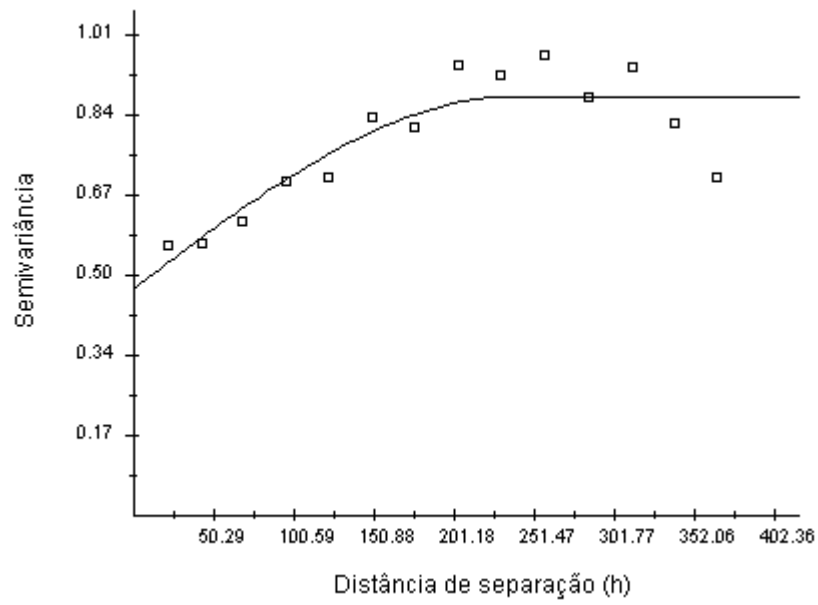


Figura 3B. Semivariograma teórico ajustado para a condutividade elétrica aparente do solo para 0,20 m de profundidade.

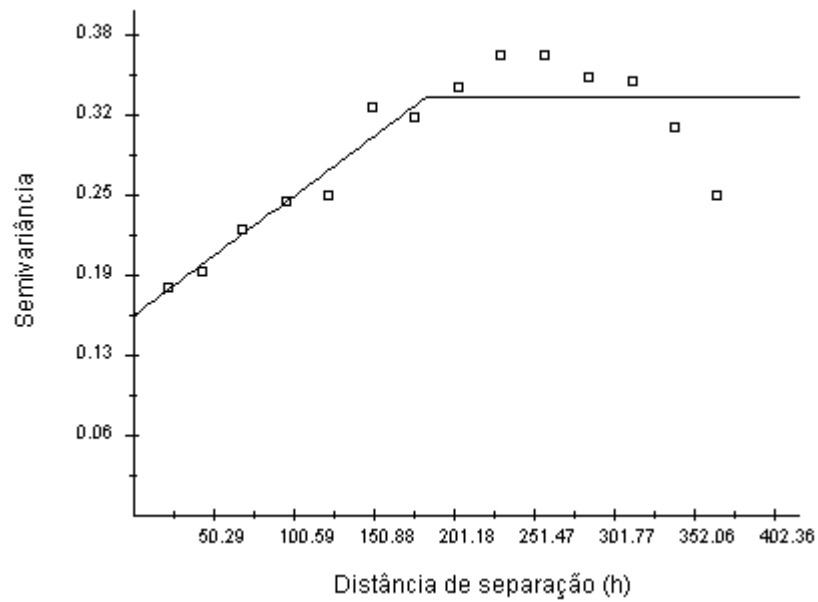


Figura 4B. Semivariograma teórico ajustado para a condutividade elétrica aparente do solo para a 0,40 m de profundidade.

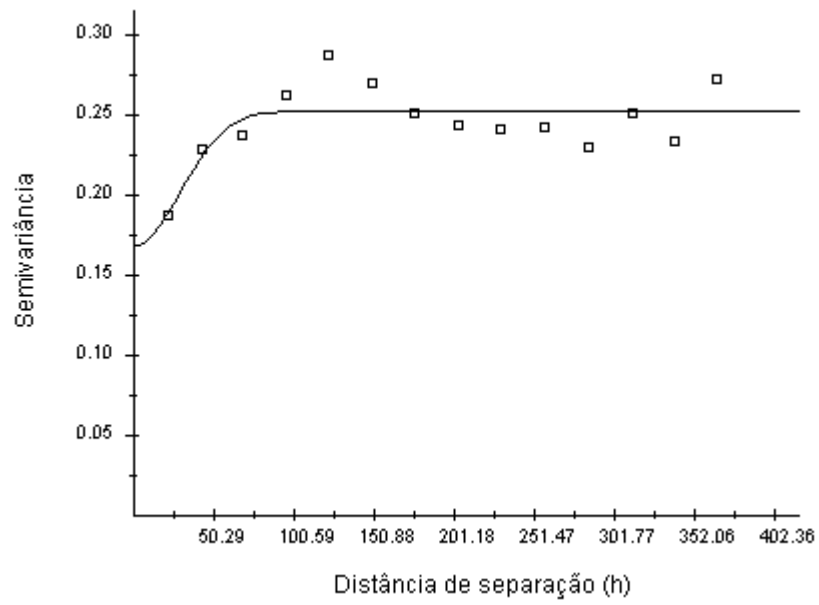


Figura 5B. Semivariograma teórico ajustado para o pH do solo.

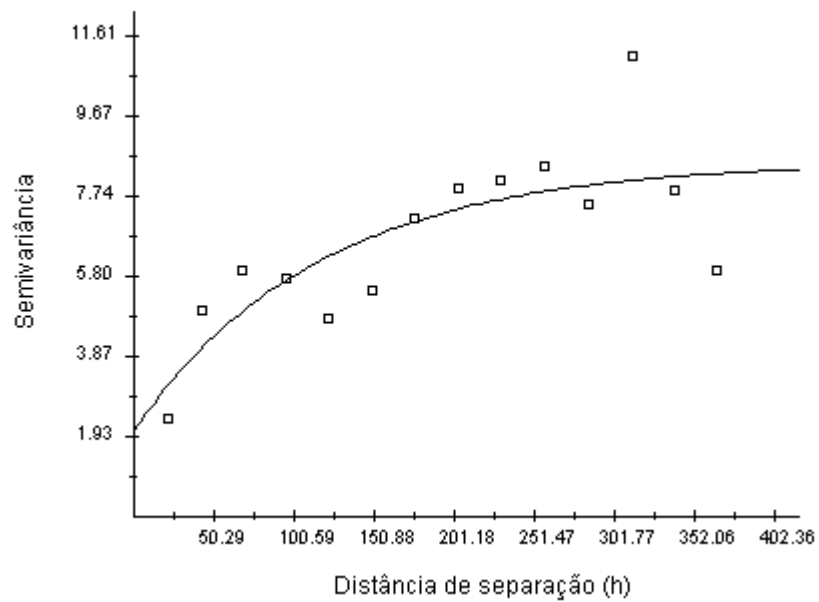


Figura 6B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de fósforo no solo.

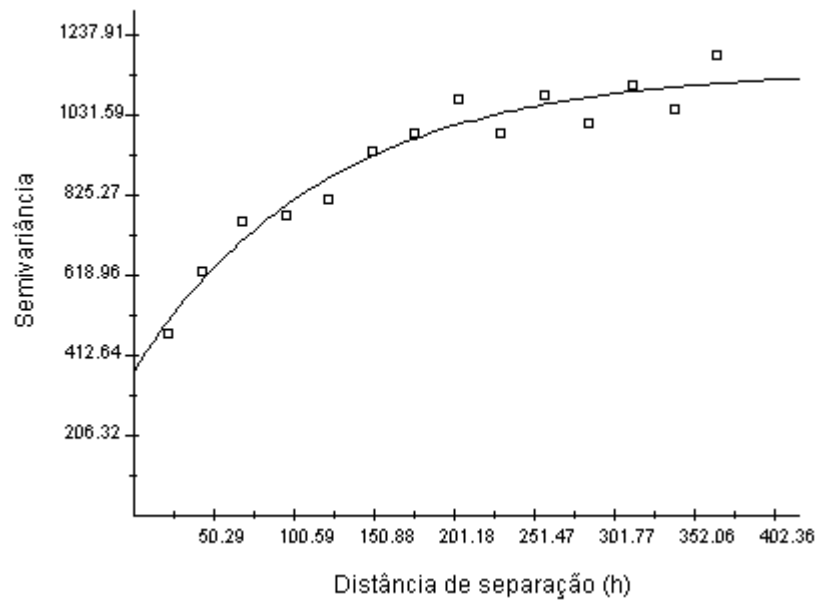


Figura 7B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de potássio no solo.

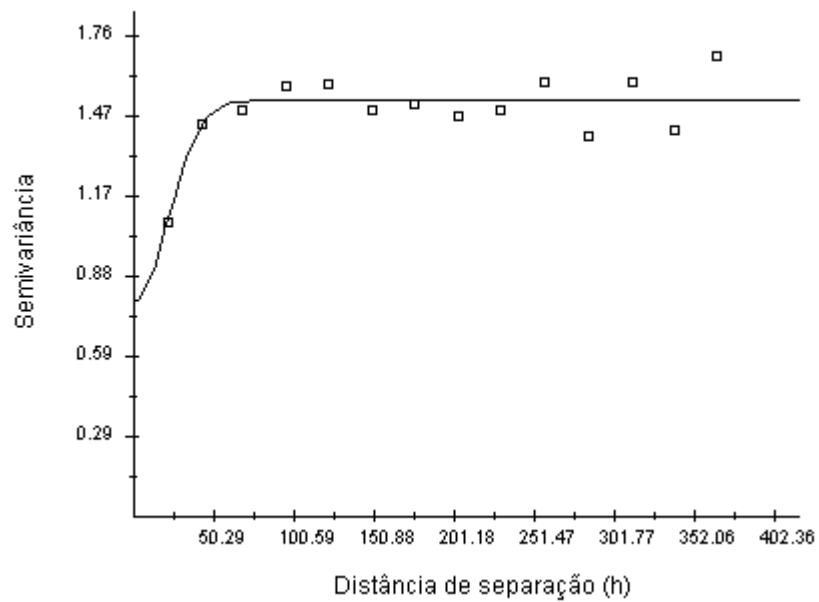


Figura 8B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de cálcio no solo.

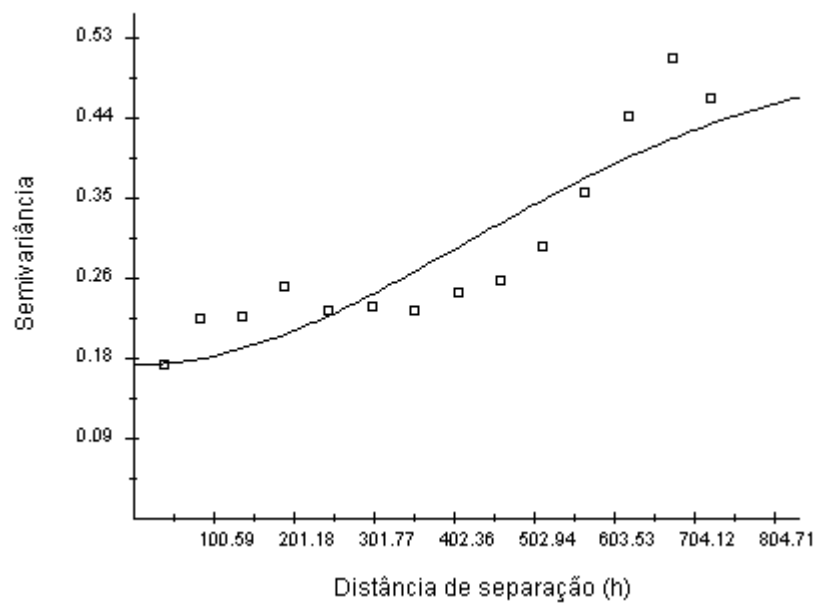


Figura 9B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de magnésio no solo.

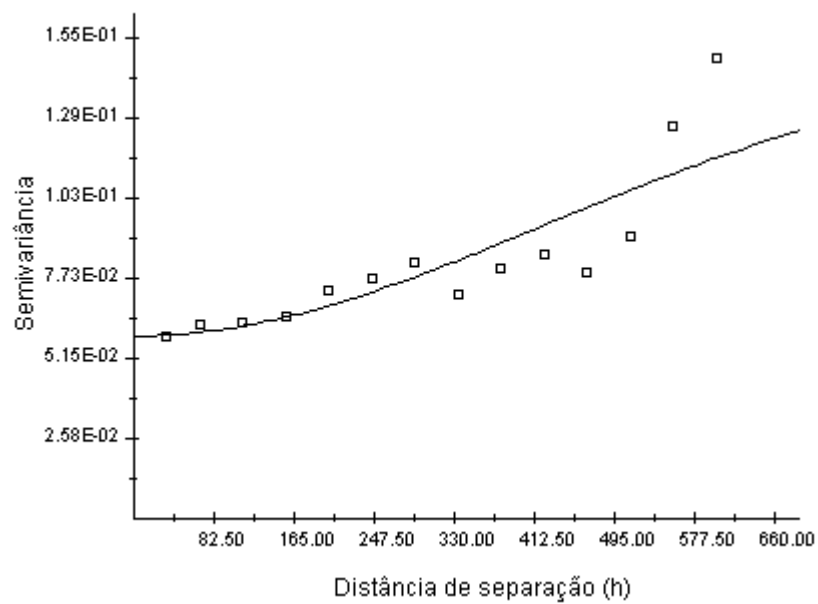


Figura 10B. Semivariograma teórico ajustado para a acidez trocável do solo.

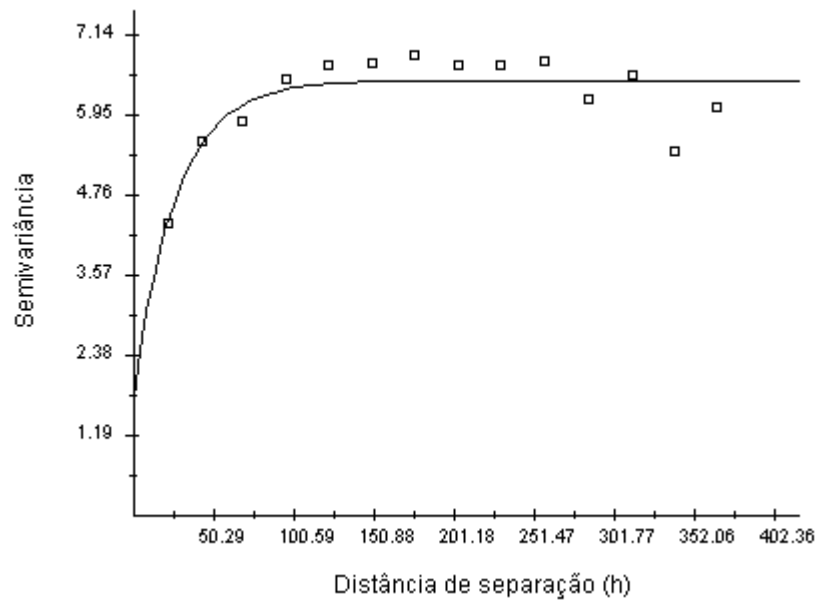


Figura 11B. Semivariograma teórico ajustado para a acidez potencial no solo.

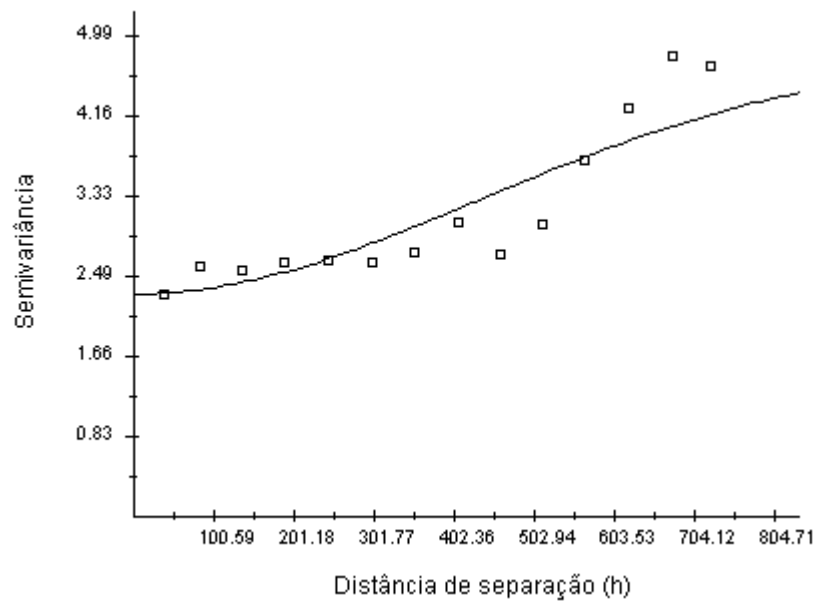


Figura 12B. Semivariograma teórico ajustado para a soma de bases no solo.

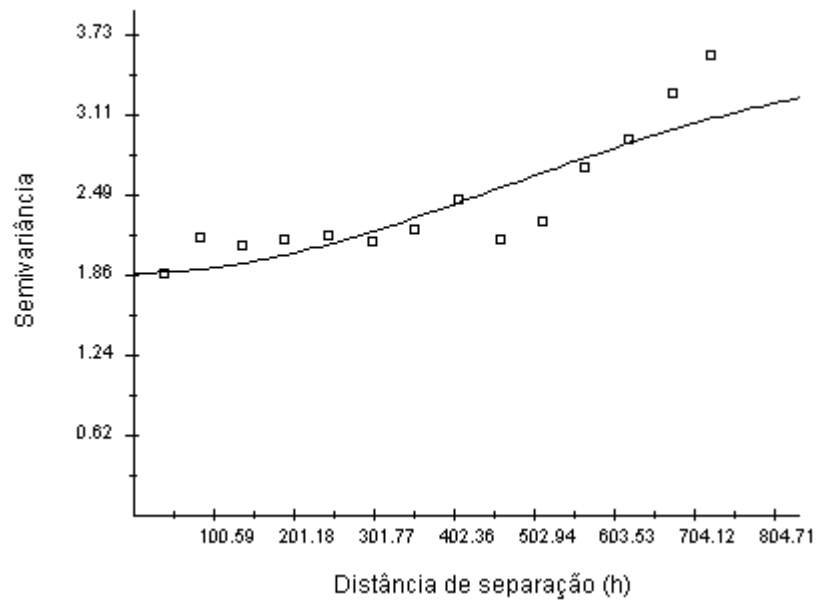


Figura 13B. Semivariograma teórico ajustado para a capacidade de troca de cátions efetiva.

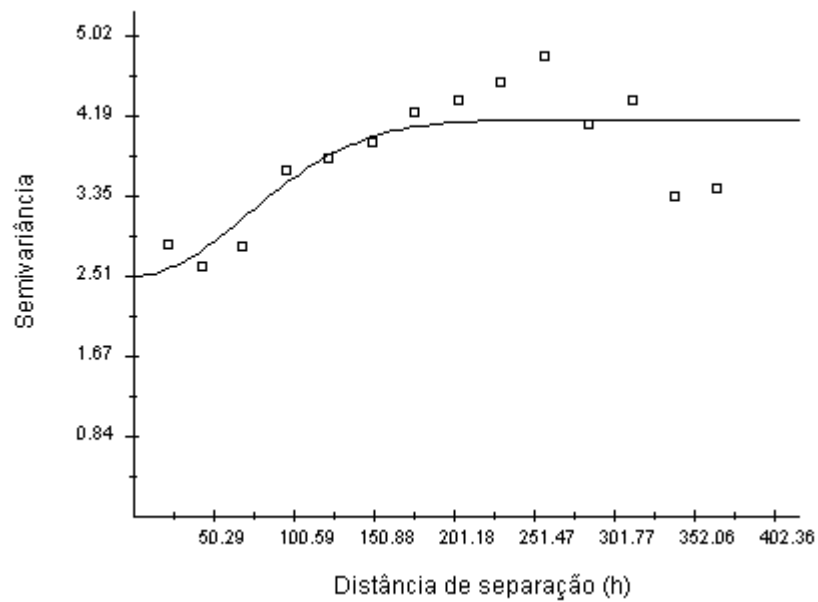


Figura 14B. Semivariograma teórico ajustado para capacidade de troca de cátions à pH 7.

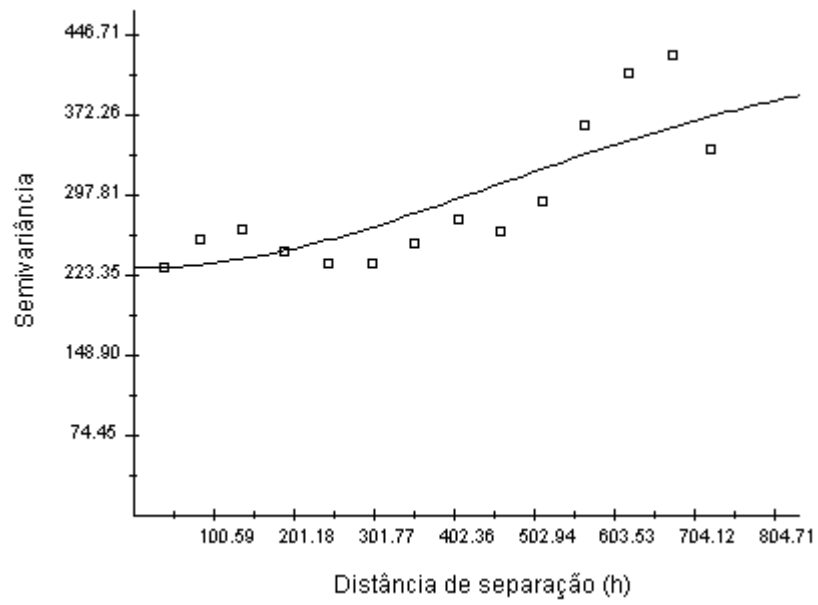


Figura 15B. Semivariograma teórico ajustado para a saturação por bases no solo.

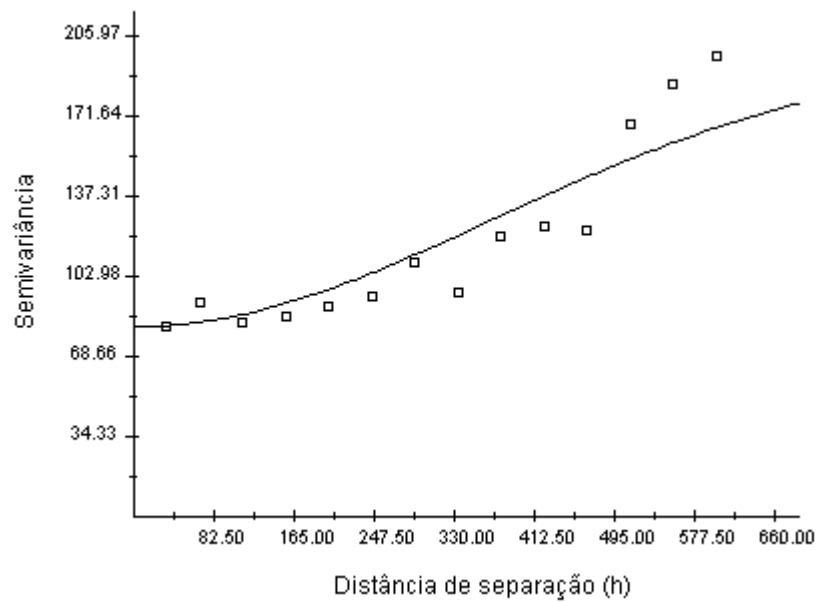


Figura 16B. Semivariograma teórico ajustado para acidez potencial no solo.

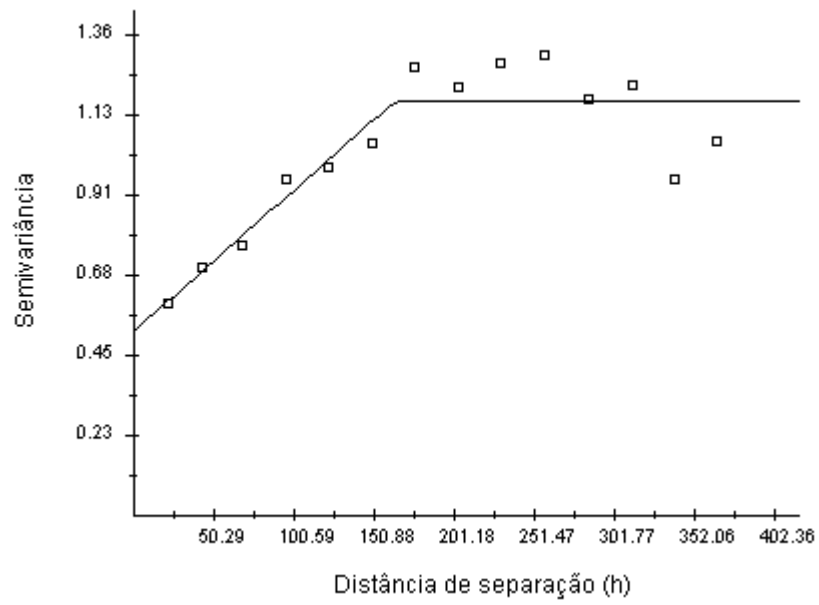


Figura 17B. Semivariograma teórico ajustado para o teor de matéria orgânica no solo.

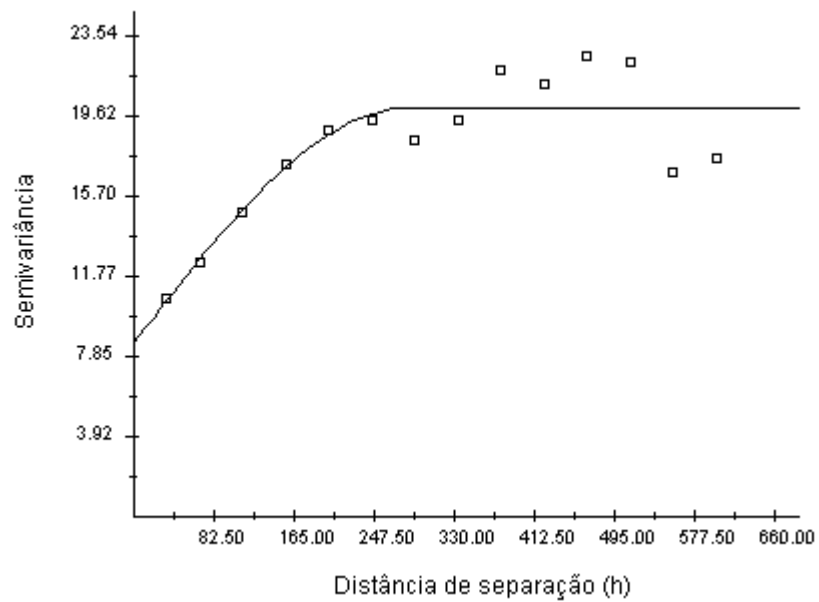


Figura 18B. Semivariograma teórico ajustado para o teor de fósforo remanescente no solo.

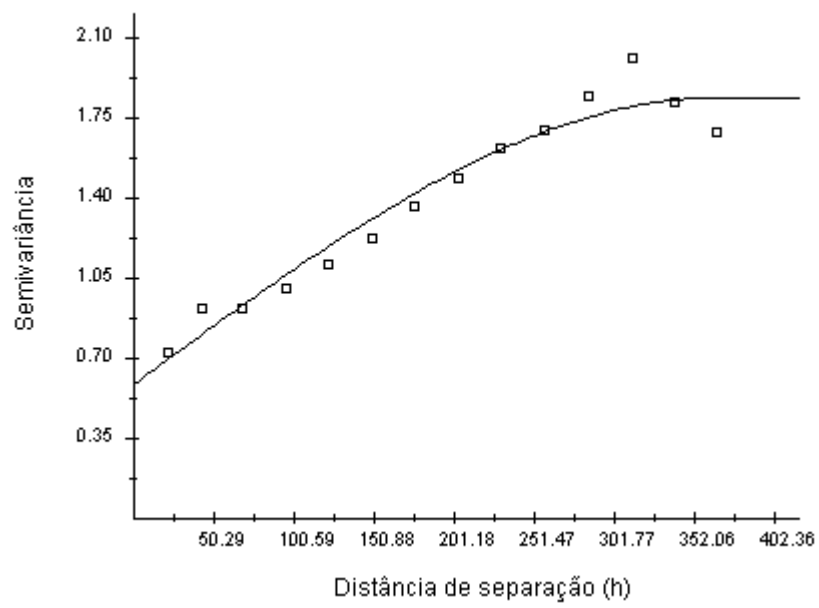


Figura 19B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de zinco no solo.

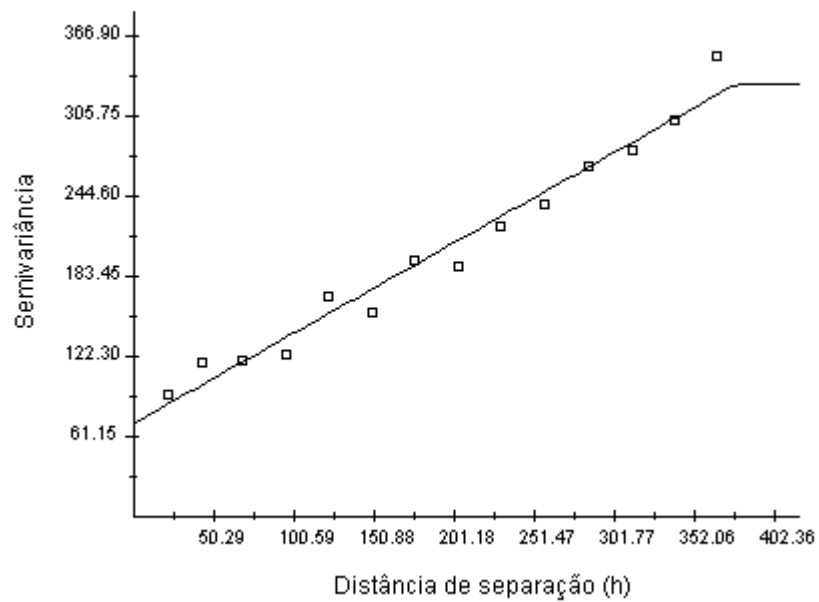


Figura 20B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de ferro no solo.

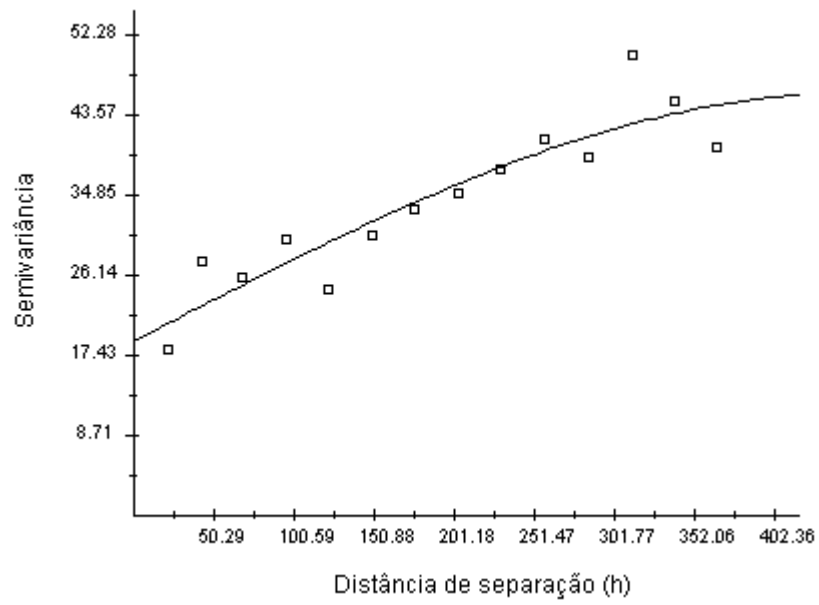


Figura 21B. Semivariograma teórico ajustado para a disponibilidade de manganês no solo.

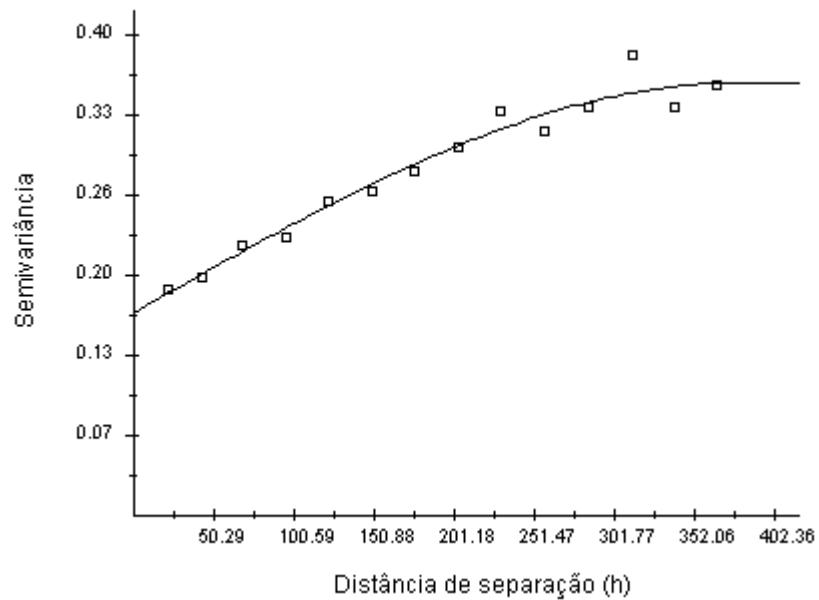


Figura 22B. Semivariograma teórico ajustado da disponibilidade de cobre no solo.

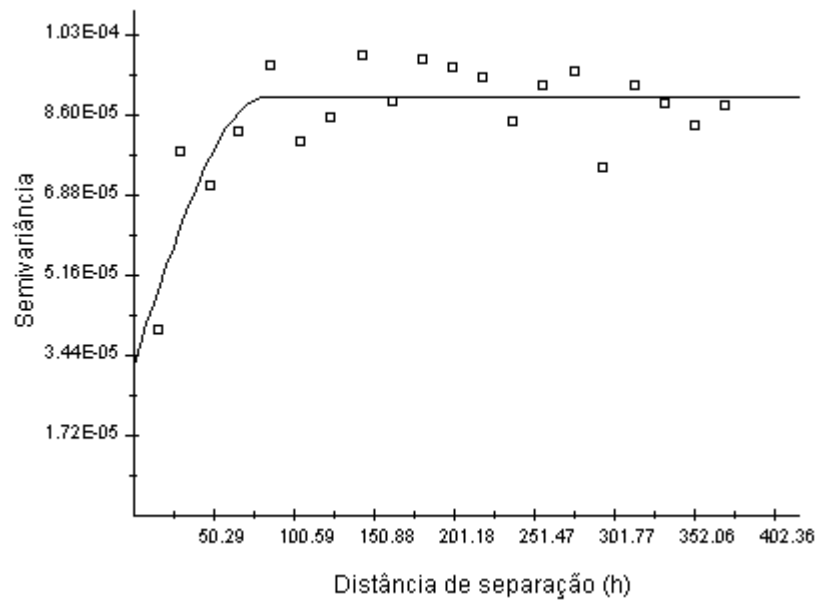


Figura 23B. Semivariograma teórico ajustado para a condutividade elétrica do extrato de Solo 1:5.

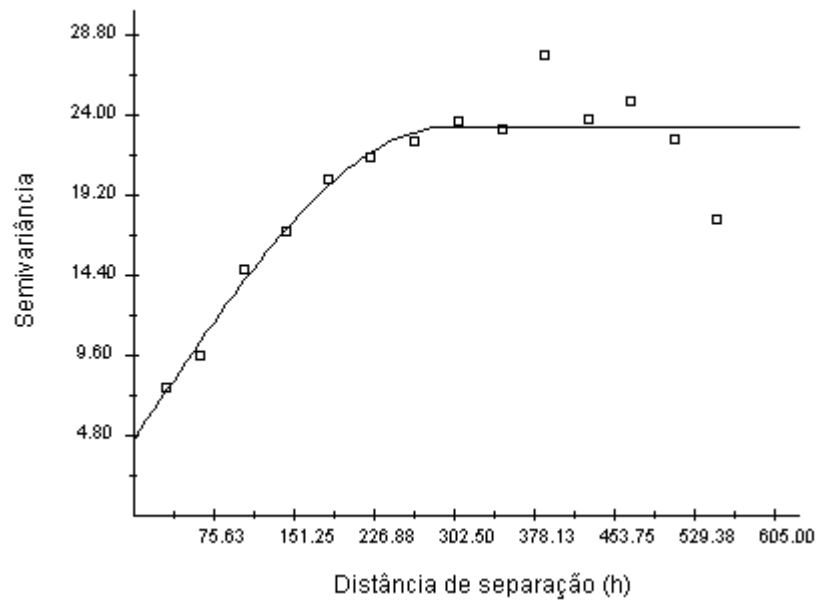


Figura 24B. Semivariograma teórico ajustado para o teor de areia grossa no solo.

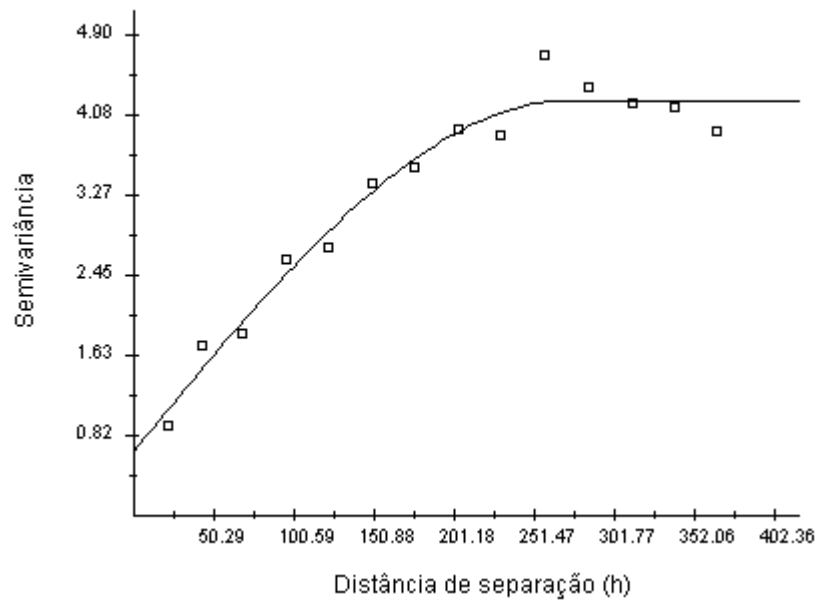


Figura 25B. Semivariograma teórico ajustado para o teor de areia fina no solo.

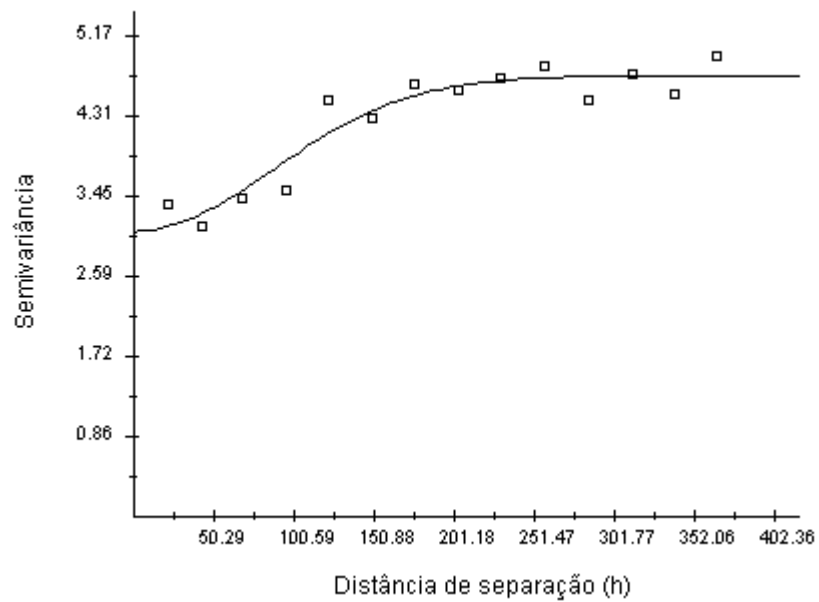


Figura 26B. Semivariograma teórico ajustado para o teor de silte no solo.

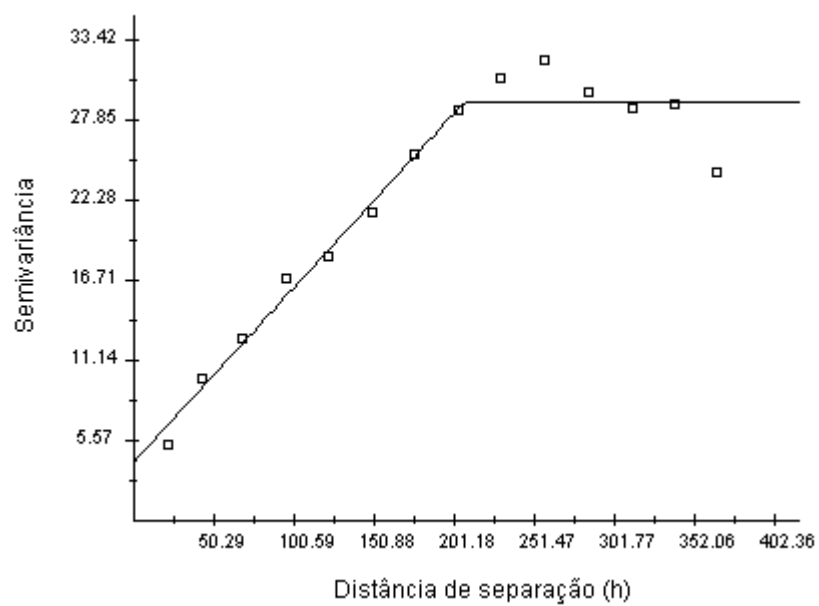


Figura 27B. Semivariograma teórico ajustado para o teor de argila no solo.

Apêndice C

Validação cruzada dos mapas interpolados pela metodologia de krigagem

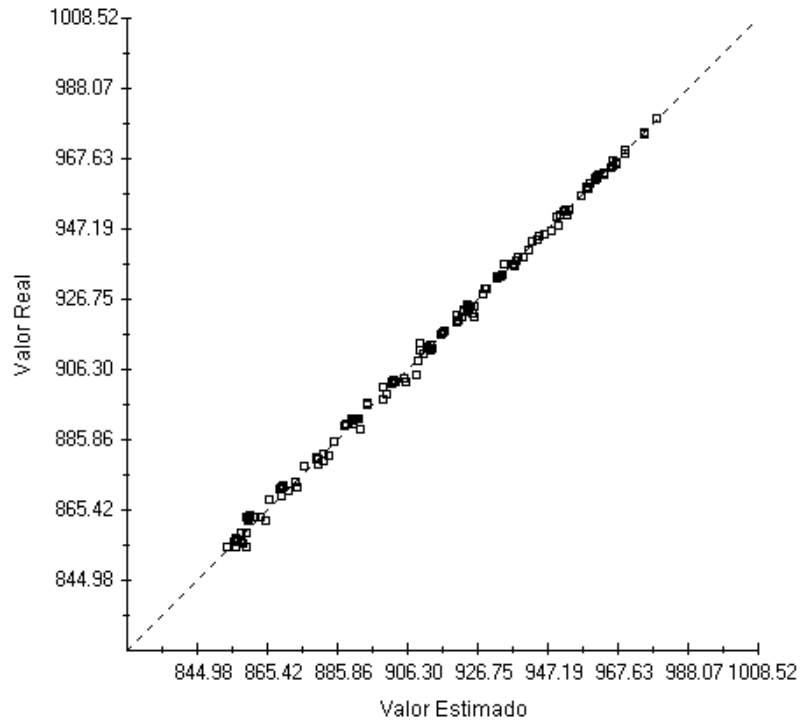


Figura 1C. Validação cruzada para a interpolação da altitude.

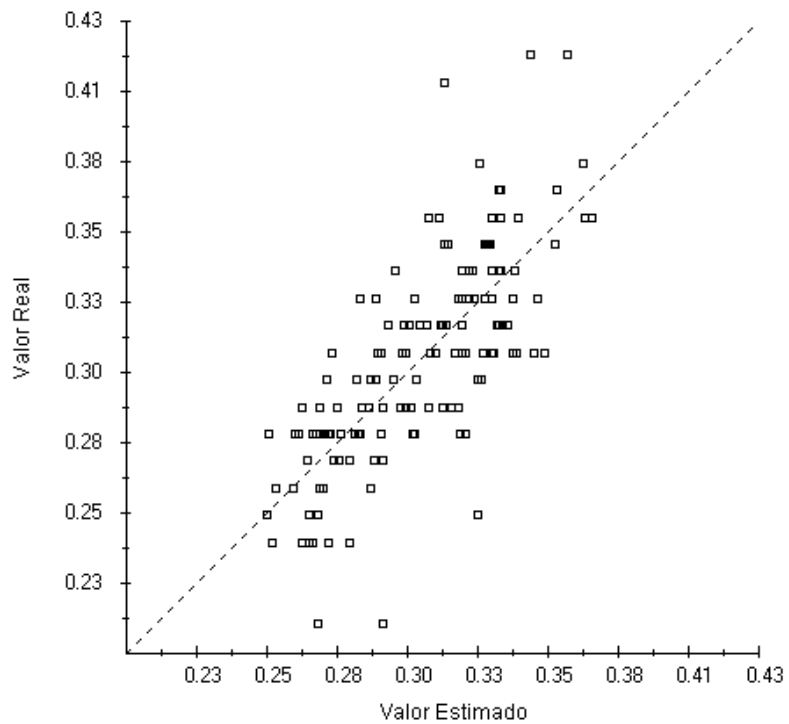


Figura 2C. Validação cruzada para a interpolação da umidade atual do solo.

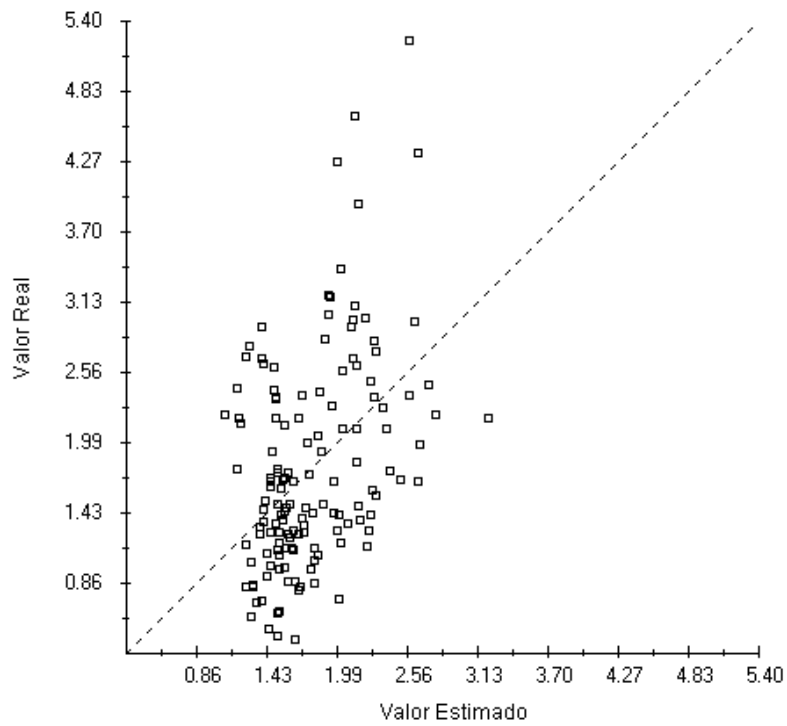


Figura 3C. Validação cruzada para a interpolação da condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m de profundidade.

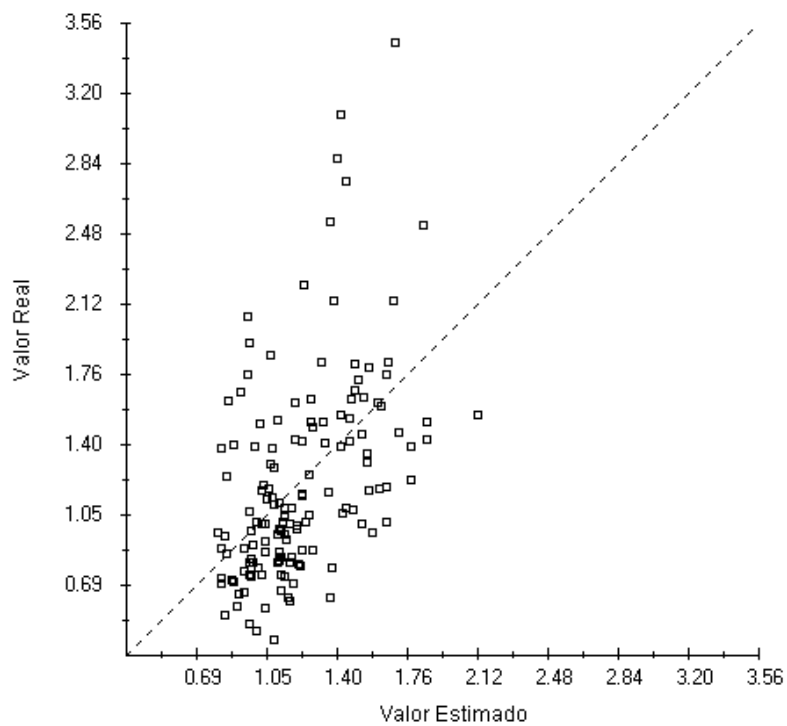


Figura 4C. Validação cruzada para a interpolação da condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade.

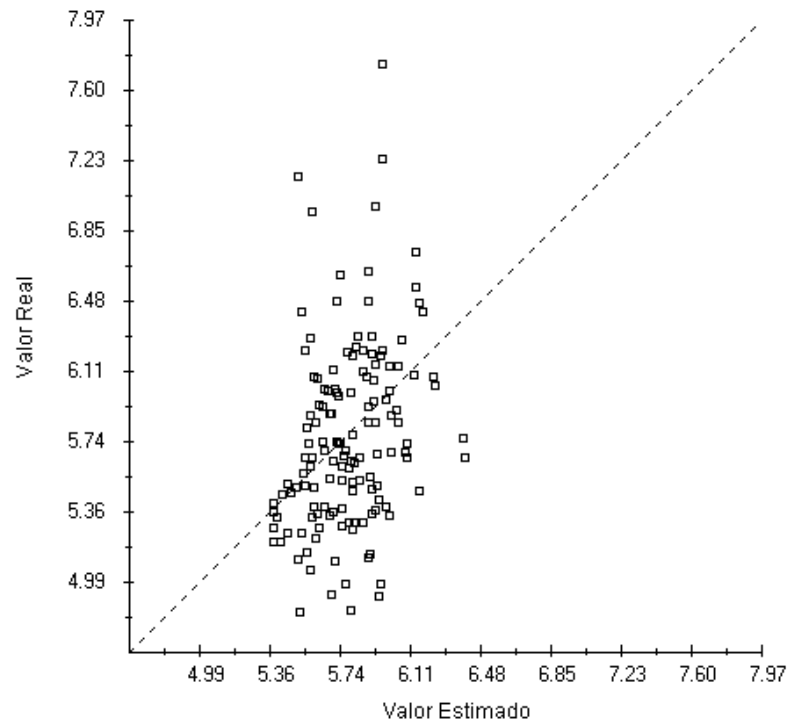


Figura 5C. Validação cruzada para a interpolação do pH do solo.

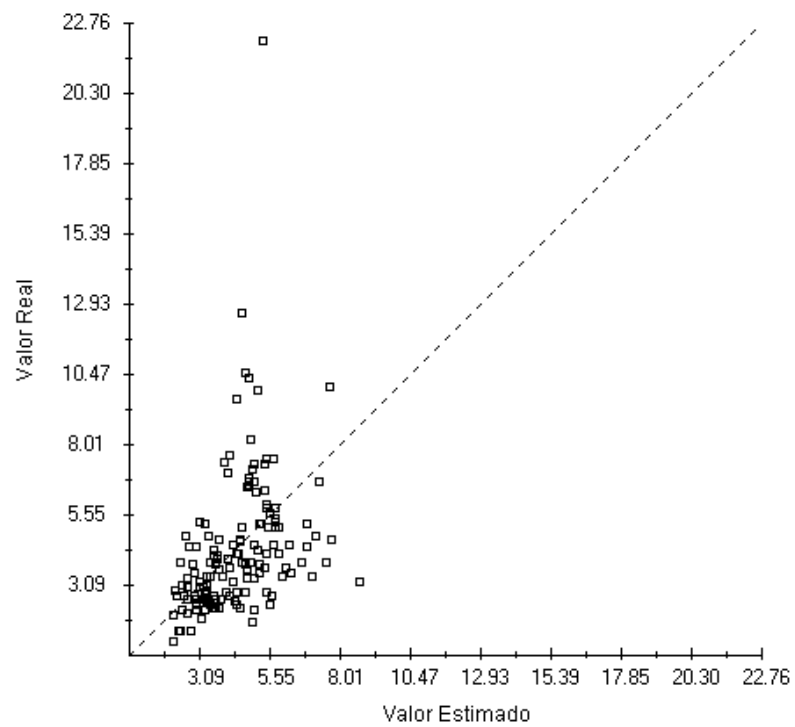


Figura 6C. Validação cruzada para a interpolação do fósforo no solo.

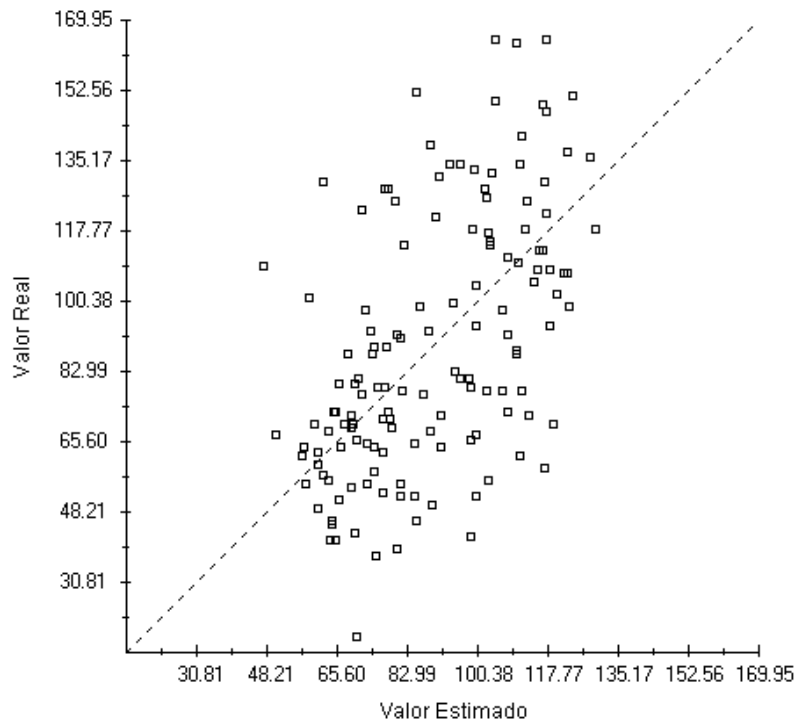


Figura 7C. Validação cruzada para a interpolação do potássio no solo.

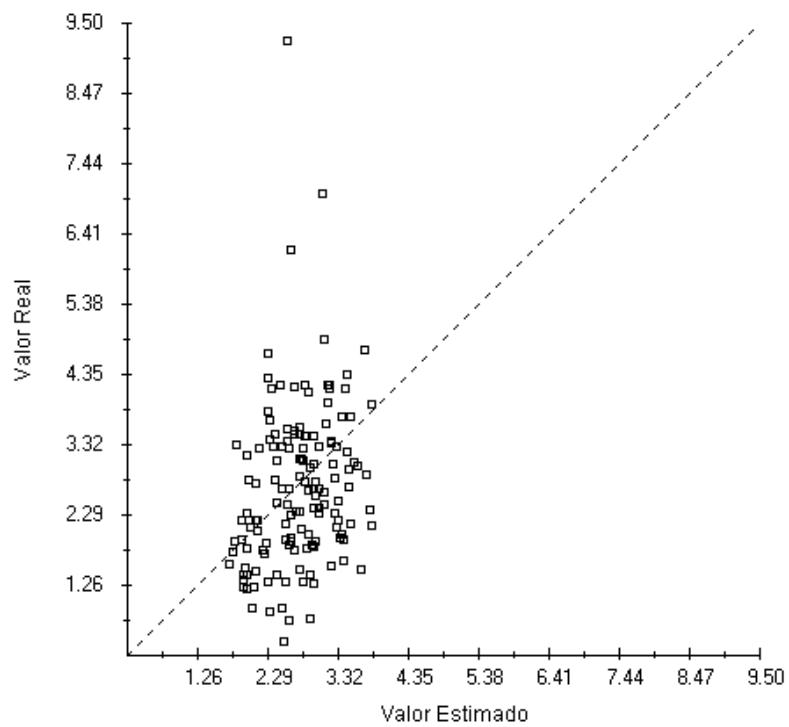


Figura 8C. Validação cruzada para a interpolação do cálcio no solo.

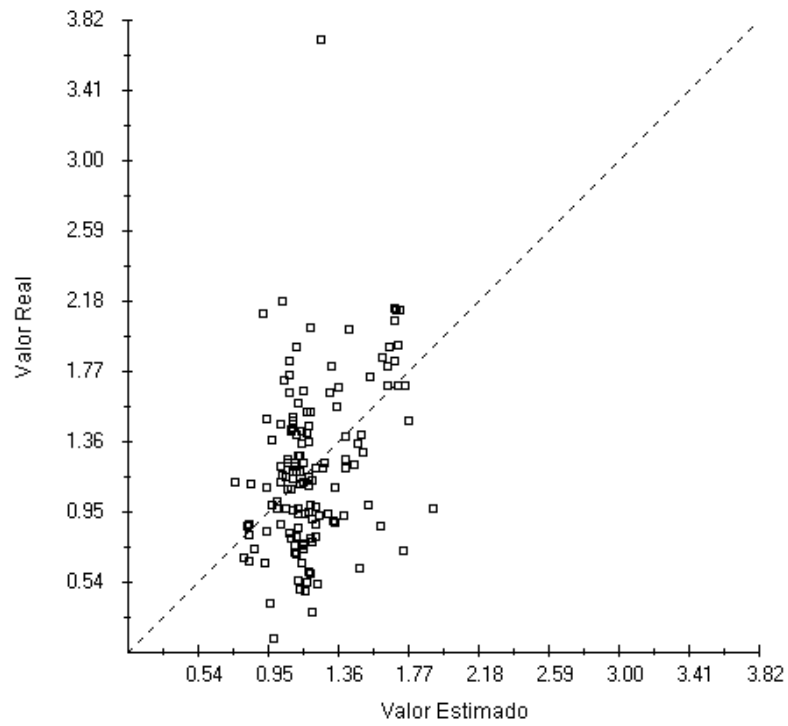


Figura 9C. Validação cruzada para a interpolação magnésio no solo.

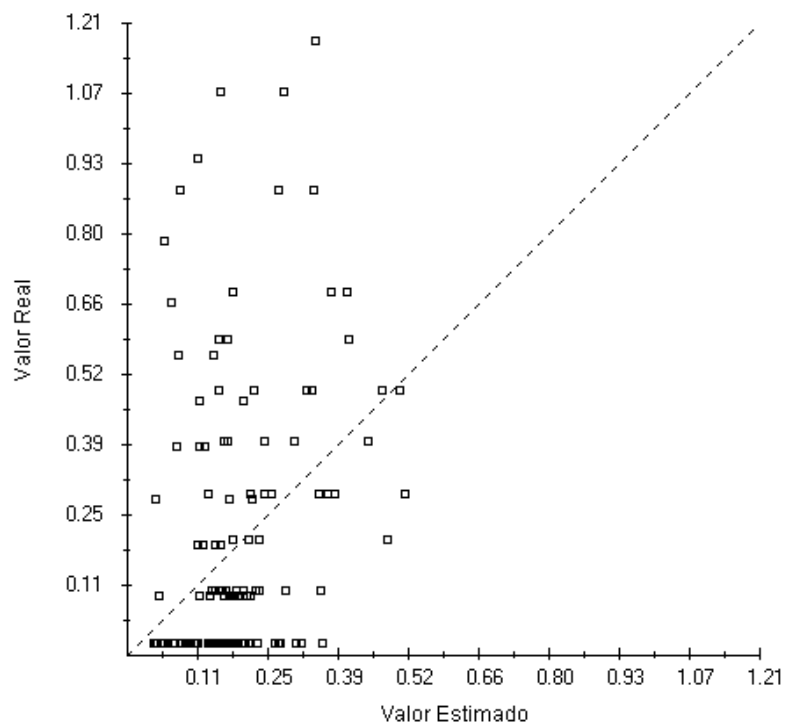


Figura 10C. Validação cruzada para a interpolação da acidez trocável do solo.

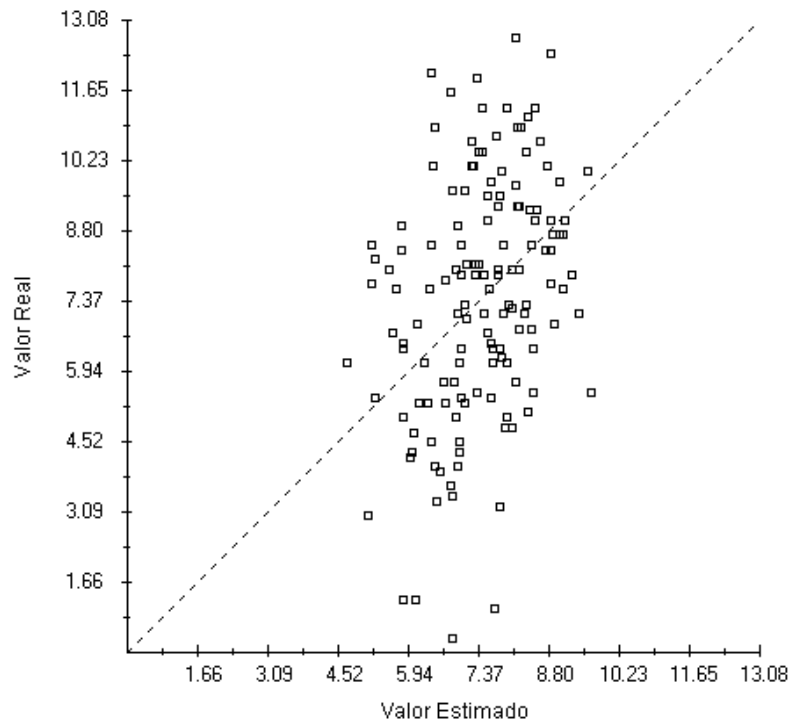


Figura 11C. Validação cruzada para a interpolação da acidez potencial no solo.

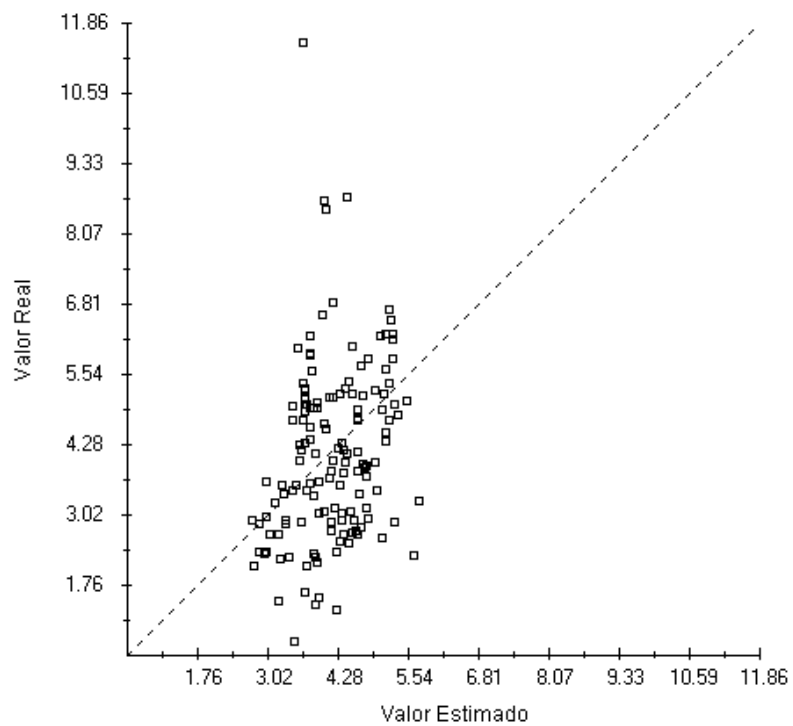


Figura 12C. Validação cruzada para a interpolação da soma de bases.

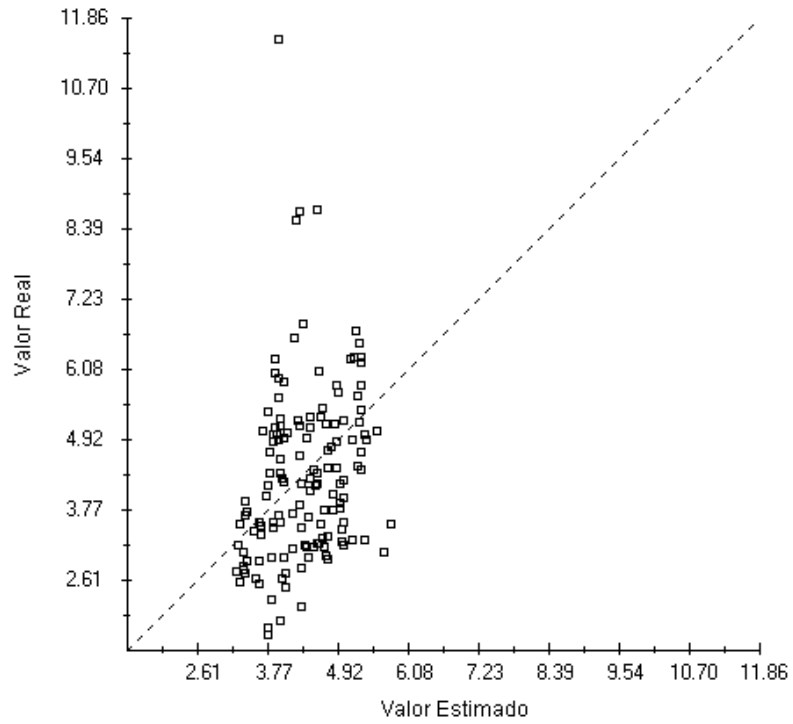


Figura 13C. Validação cruzada para a interpolação da capacidade de troca de cátions efetiva do solo.

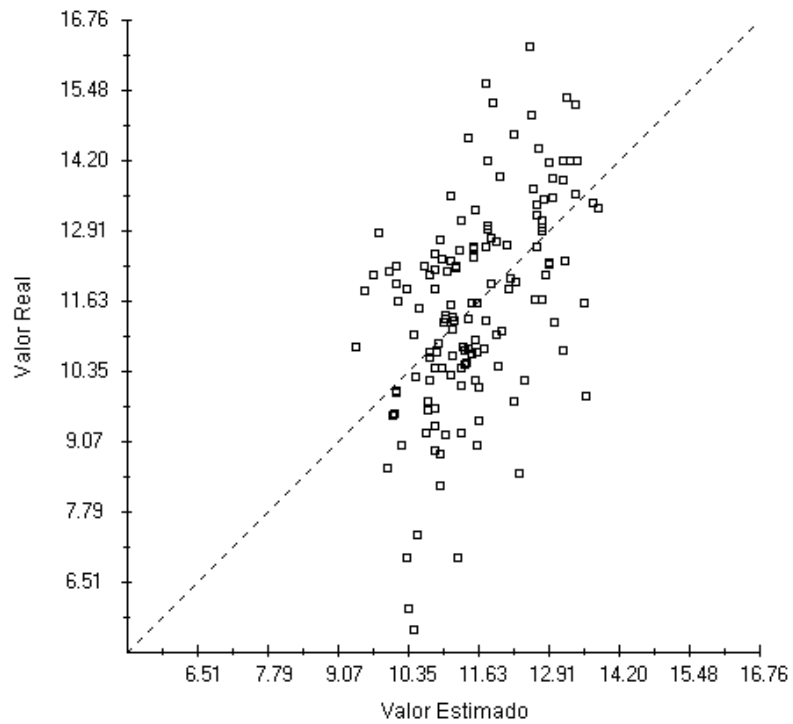


Figura 14C. Validação cruzada para a interpolação da capacidade de troca de cátions a pH 7.

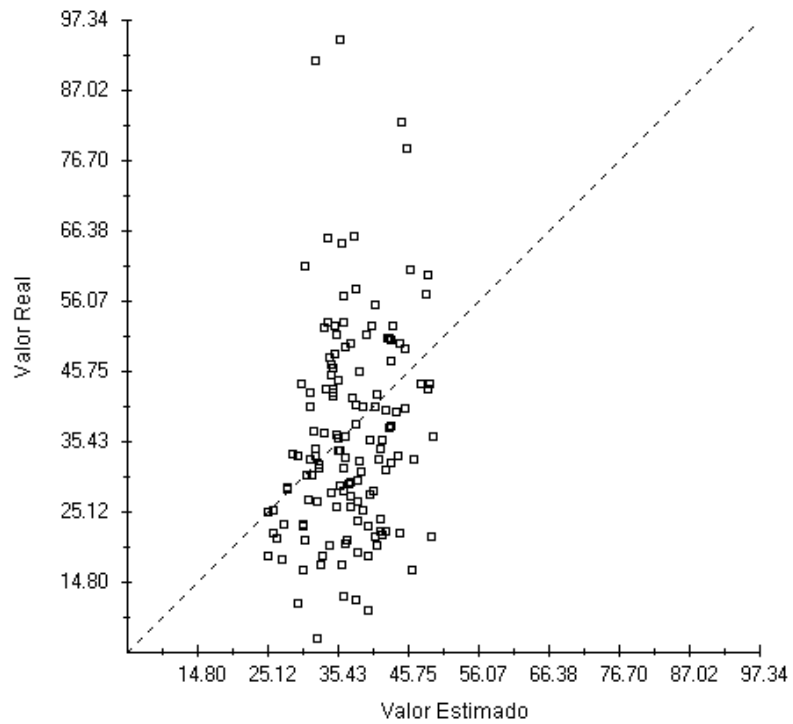


Figura 15C. Validação cruzada para a interpolação da saturação por bases.

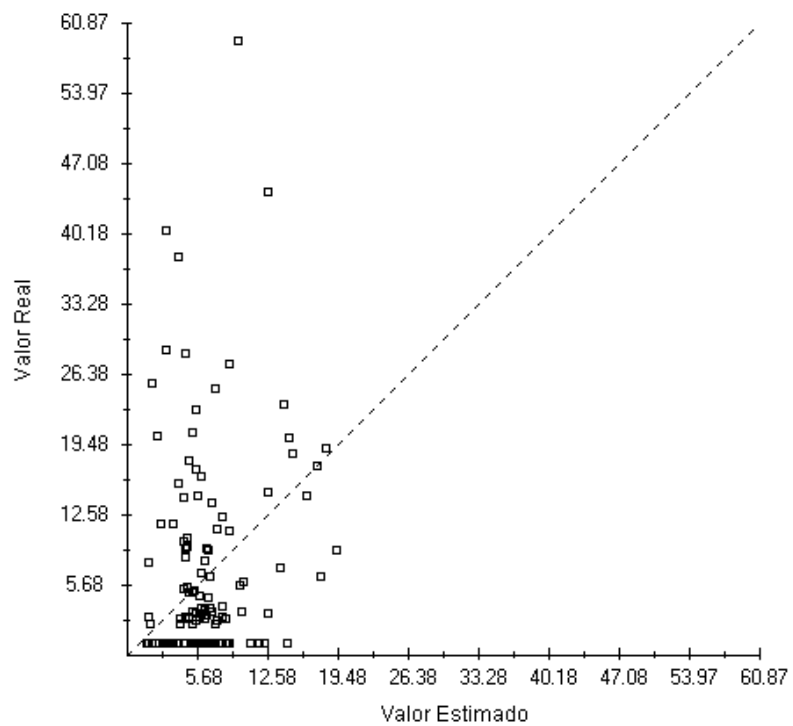


Figura 16C. Validação cruzada para a interpolação da saturação por alumínio.

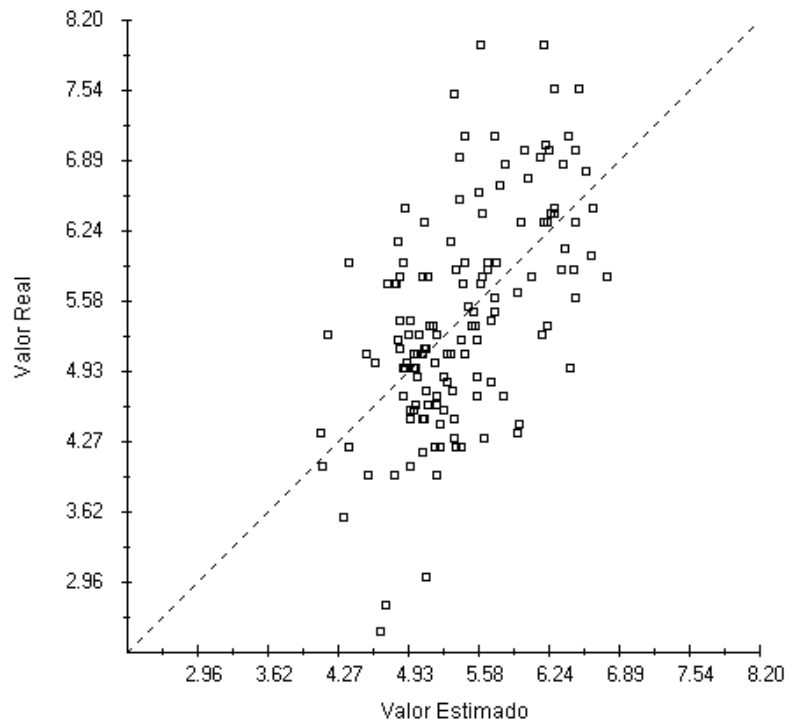


Figura 17C. Validação cruzada para a interpolação da matéria orgânica do solo.

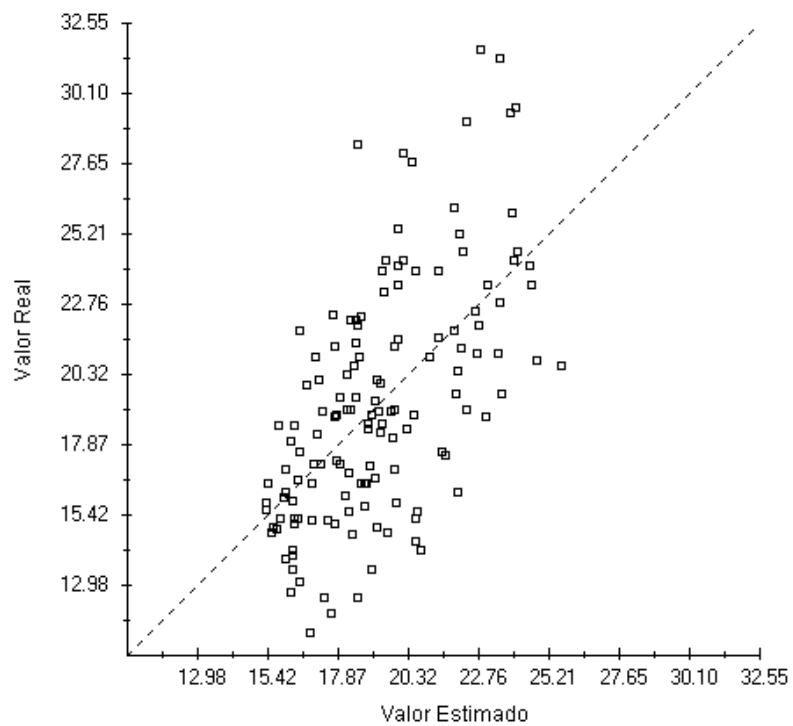


Figura 18C. Validação cruzada para a interpolação do fósforo remanescente do solo.

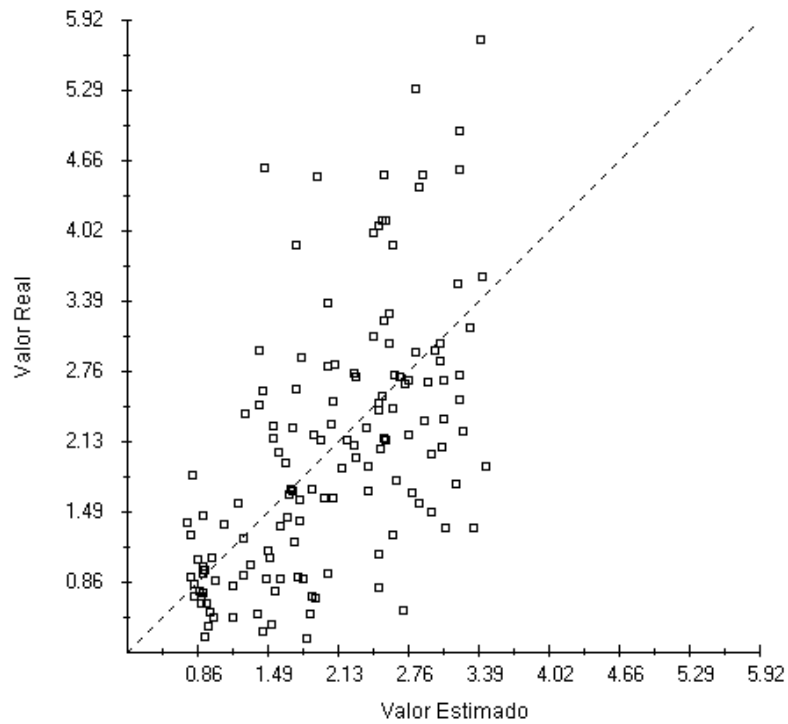


Figura 19C. Validação cruzada para a interpolação do zinco no solo.

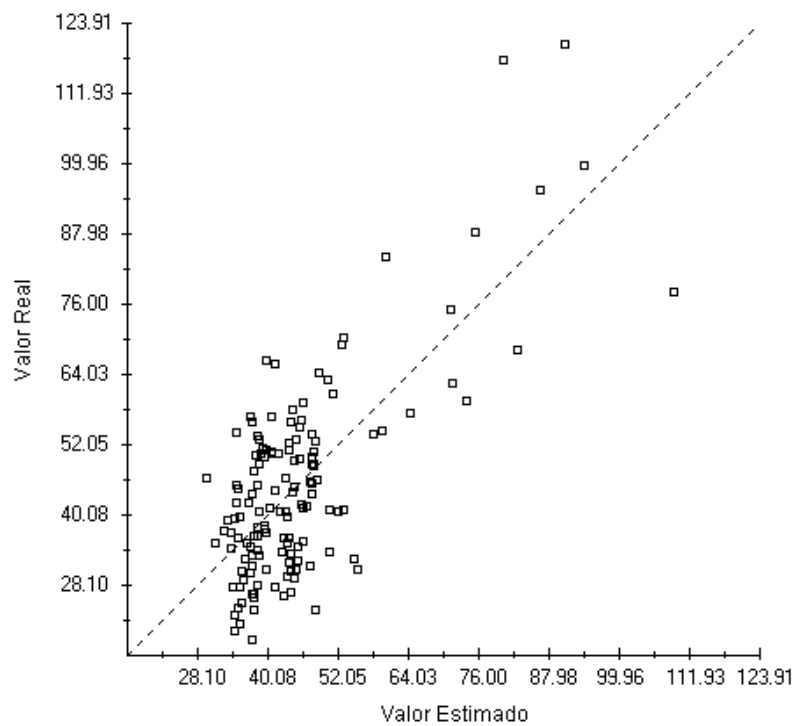


Figura 20C. Validação cruzada para a interpolação do ferro no solo.

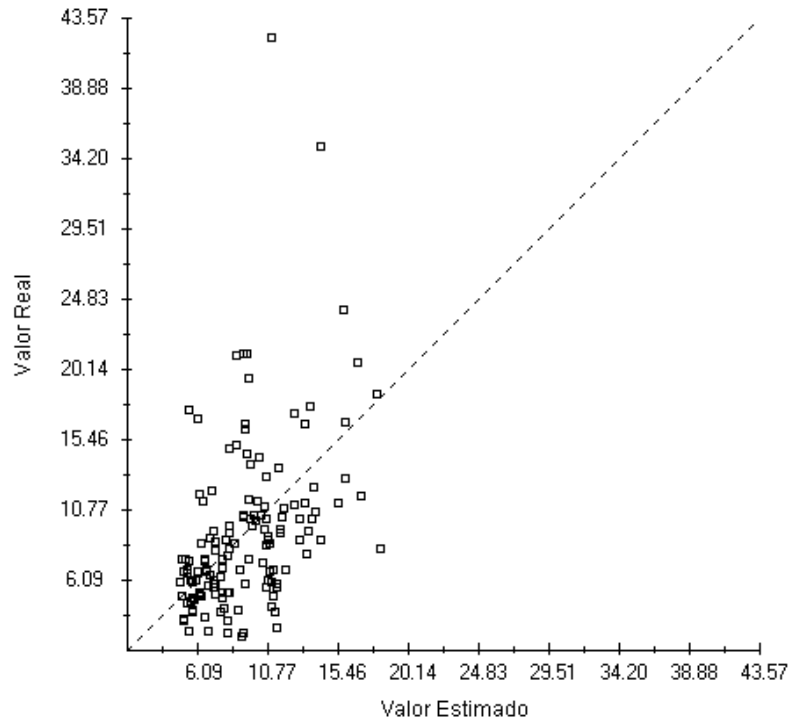


Figura 21C. Validação cruzada para a interpolação do manganês no solo.

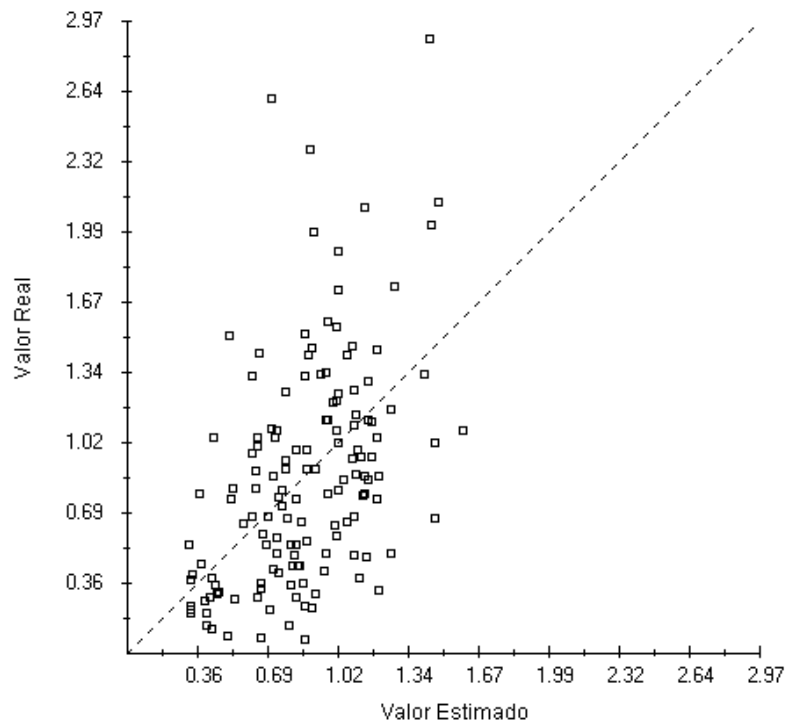


Figura 22C. Validação cruzada para a interpolação do cobre no solo.

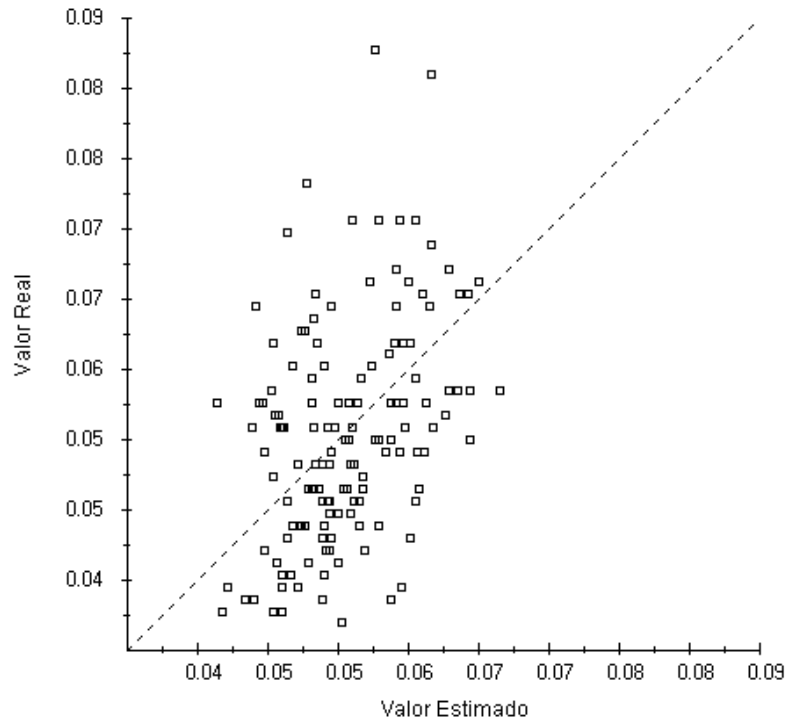


Figura 23C. Validação cruzada para a interpolação da condutividade elétrica do extrado do solo.

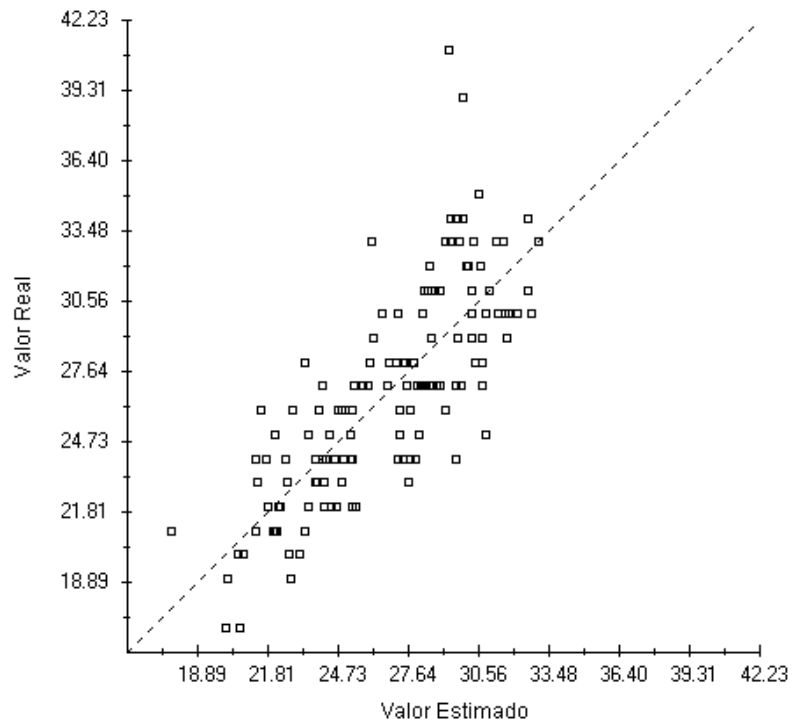


Figura 24C. Validação cruzada para a interpolação do teor de areia grossa no solo.

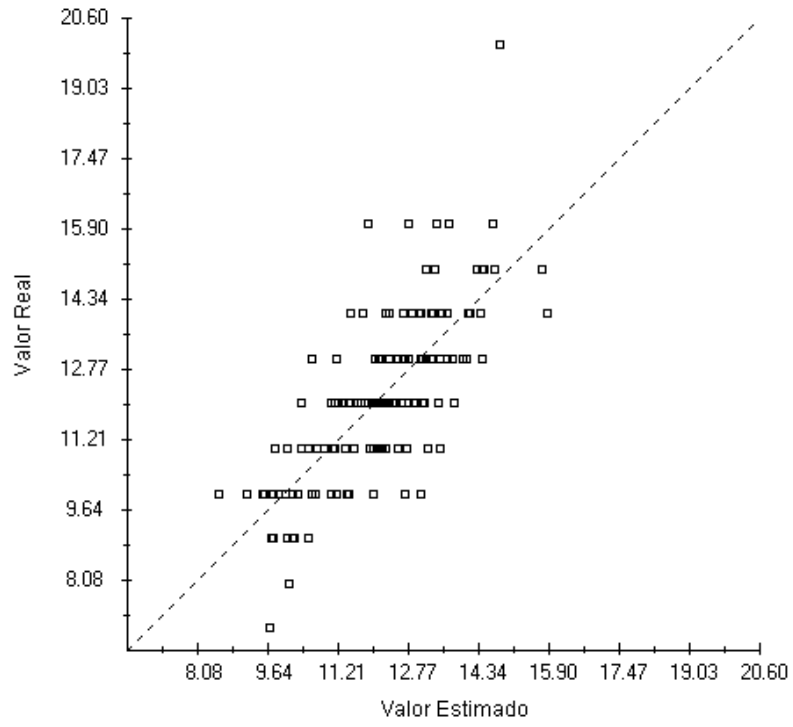


Figura 25C. Validação cruzada para a interpolação do teor de areia fina no solo.

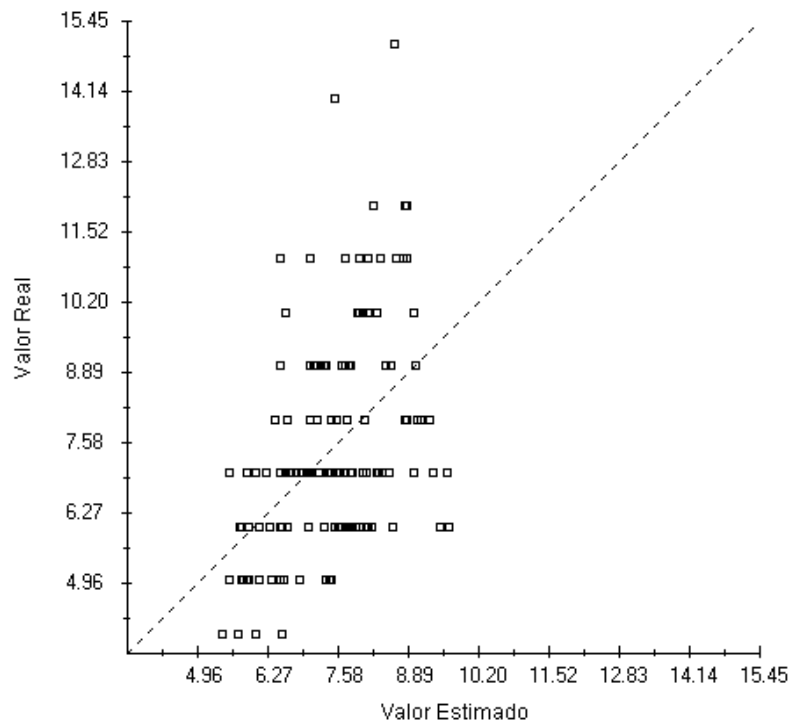


Figura 26C. Validação cruzada para a interpolação do teor de silte do solo.

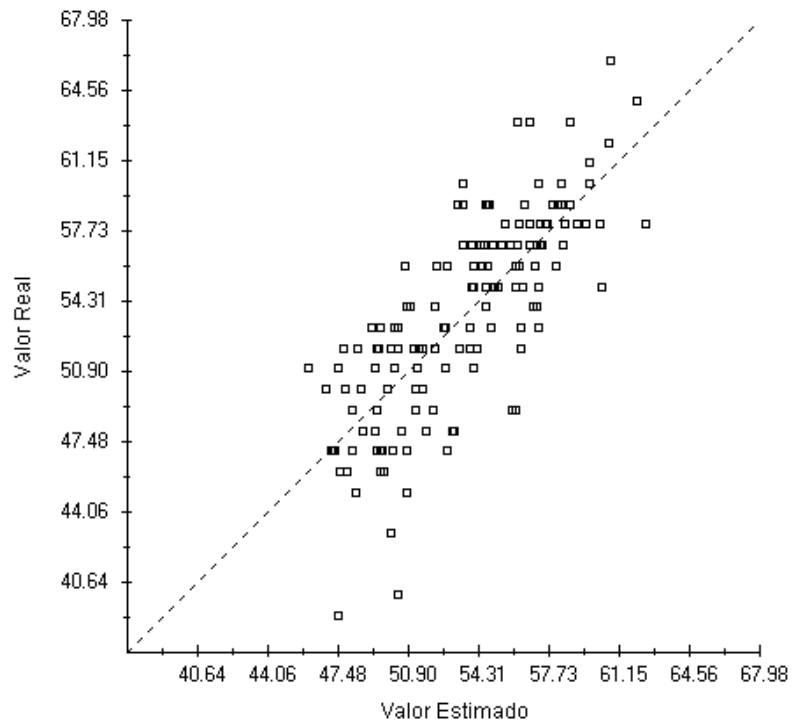


Figura 27C. Validação cruzada para a interpolação do teor de argila no solo.

Apêndice D

Mapas das propriedades do solo classificadas em três classes.

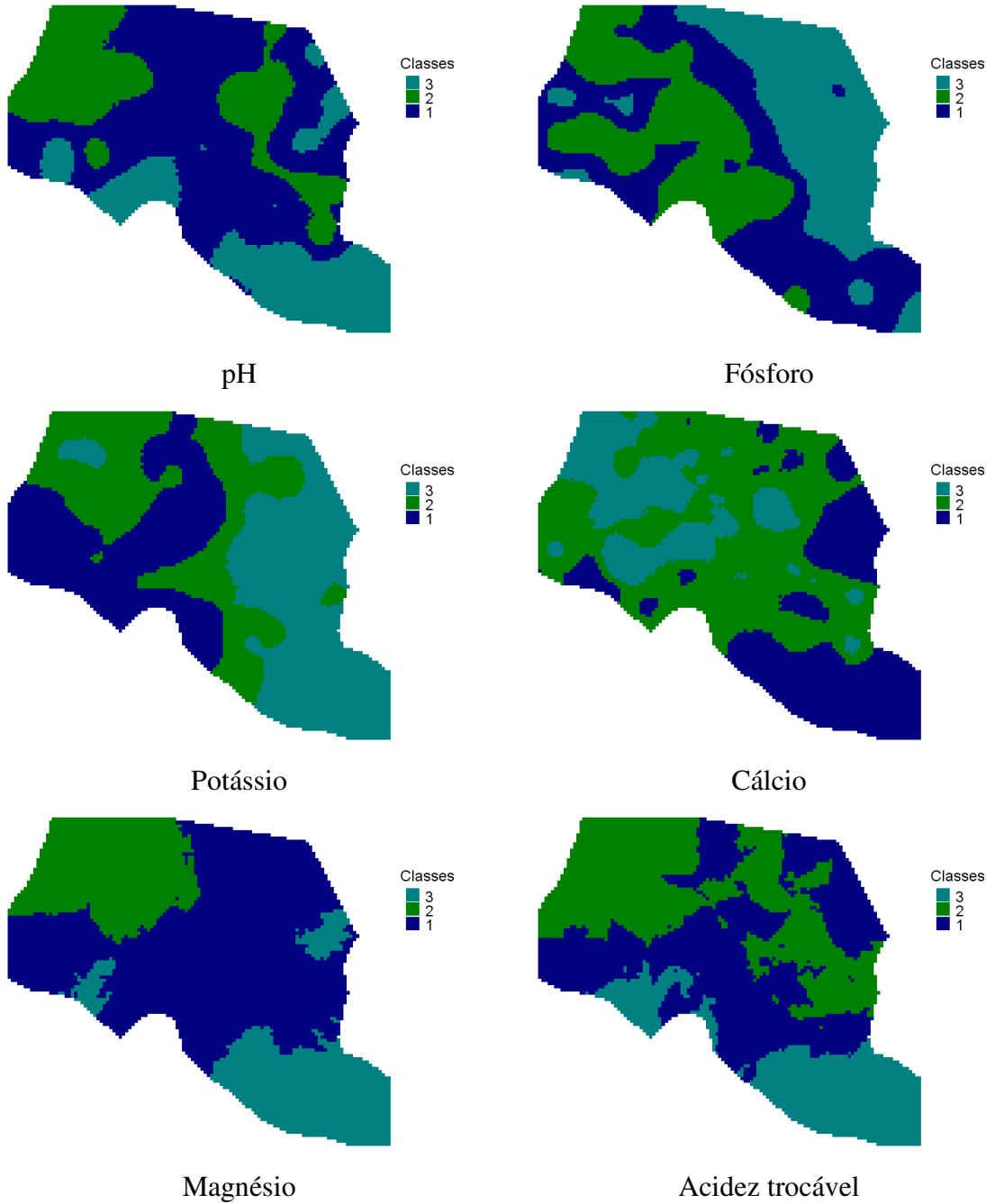
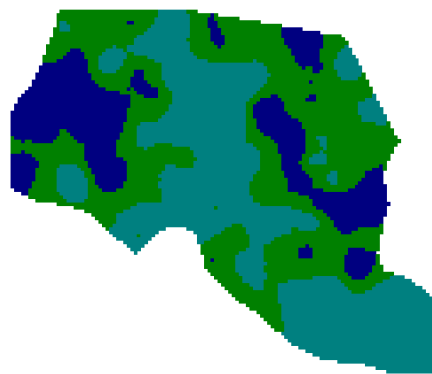
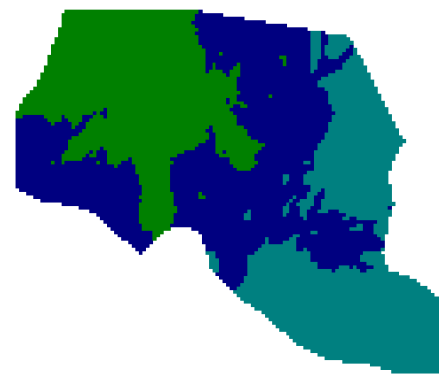


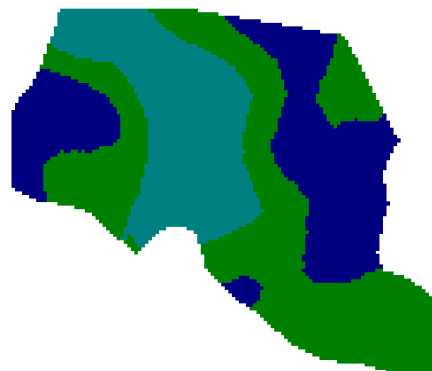
Figura 1D. Mapas das propriedades do solo classificadas em três classes



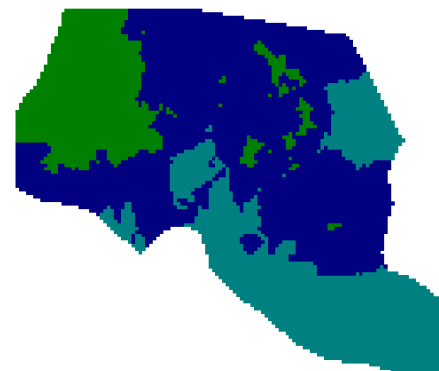
Acidez potencial



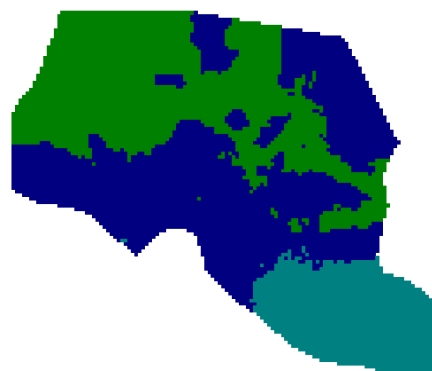
Capacidade de troca de cátions efetiva



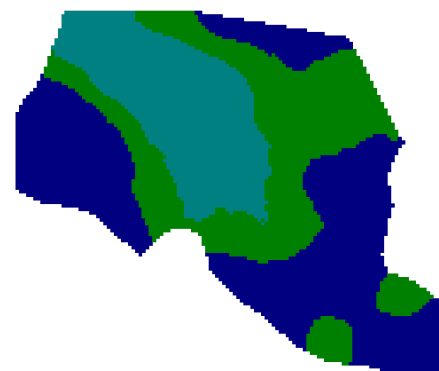
Capacidade de troca de cátions à pH 7



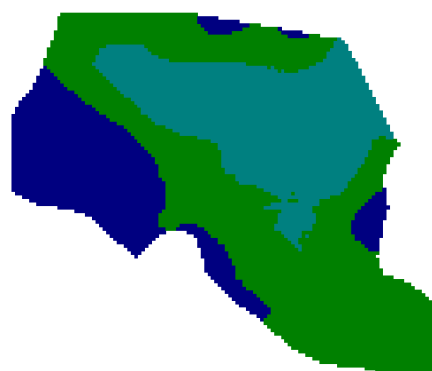
Saturação por bases



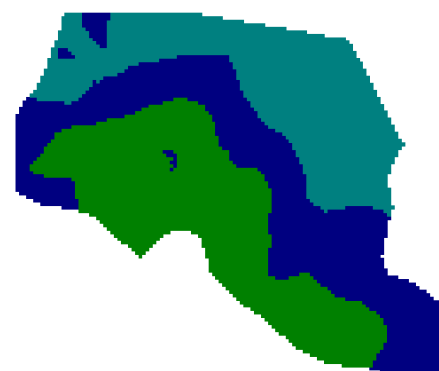
Saturação por alumínio



Matéria orgânica



Fósforo remanescente



Zinco

Figura 1D. (Continuação) Mapas das propriedades do solo classificadas em três classes.

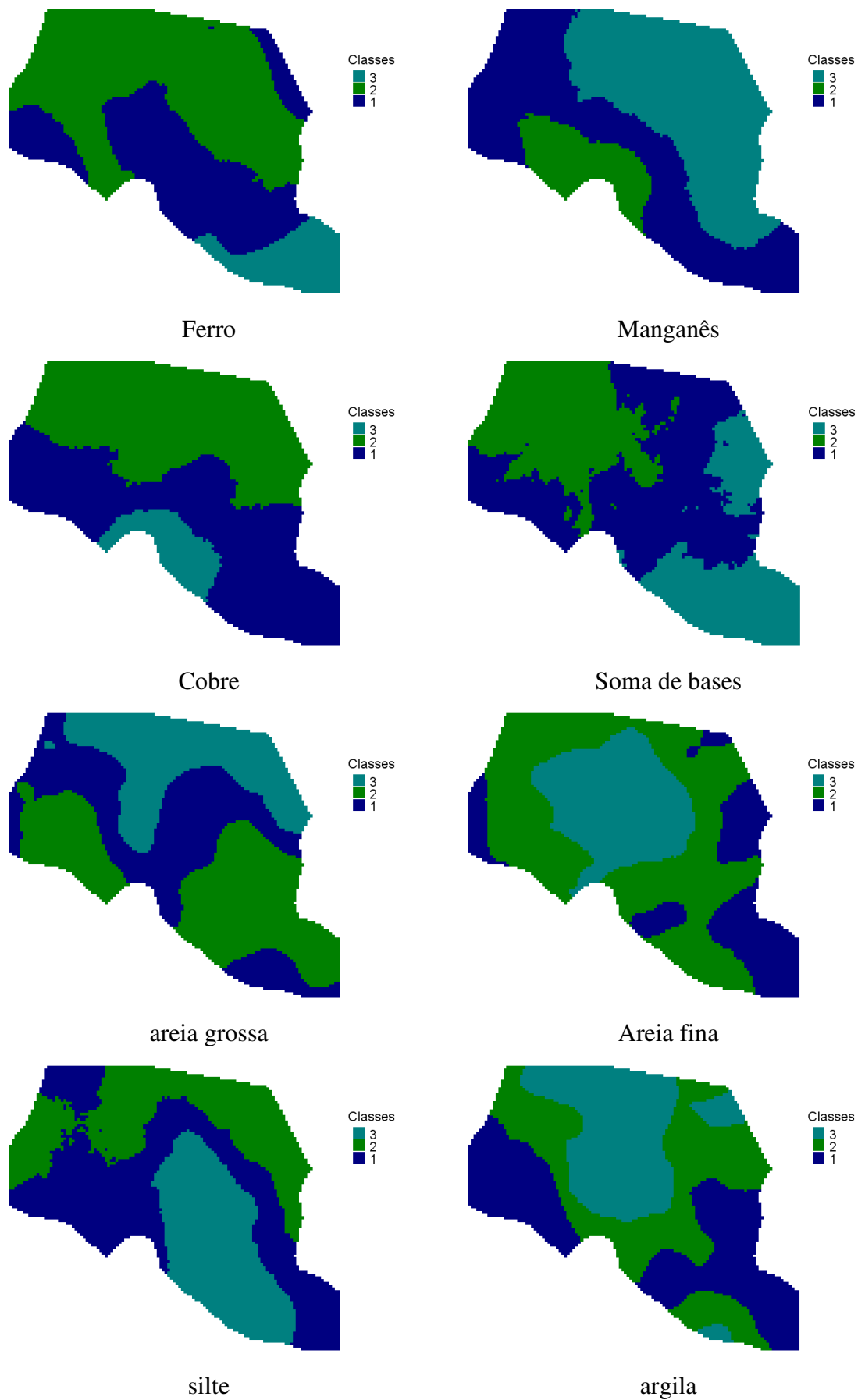


Figura 1D. (Continuação) Mapas das propriedades do solo classificadas em três classes.