

AMÉLIA LAÍSY DO NASCIMENTO

**ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DA
VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO
SOLO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

N244e
2015

Nascimento, Amélia Laísy do, 1987-
Estratégia de amostragem para caracterização da
variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo /
Amélia Laísy do Nascimento. – Viçosa, MG, 2015.
viii, 44f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Domingos Sárvio Magalhães Valente.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.32-36.

1. Agricultura de precisão. 2. Solo - Análise. 3. Solo -
Manejo. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

AMÉLIA LAÍSY DO NASCIMENTO

**ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DA
VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO
SOLO**

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

APROVADA: 24 de julho de 2015.

Igor Rodrigues de Assis

Luís César da Silva

Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Orientador)

A Dona Jô, Mara, Pedro, Maria
José, Gorete e demais familiares.

DEDICO

*“Porém se a gente vive a sonhar
Com alguém que se deseja rever
Saudade, entonce, aí é ruim
Eu tiro isso por mim
Que vivo doido a sofrer”*
(Humberto Teixeira/Luiz Gonzaga)

AGRADECIMENTOS

À Deus por tudo que Ele tem proporcionado à minha vida!

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) pela oportunidade de realizar o mestrado;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa;

Aos professores Domingos Sárvio Magalhães Valente, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Daniel Marçal de Queiroz pela atenção, confiança e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Sr. Afonso por conceder a Fazenda Braúna para coleta dos dados;

Aos professores Igor Rodrigues de Assis e Luís César da Silva pela participação na banca da defesa da dissertação;

À professora Lêda Rita D'Antonino Faroni, coordenadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFV, e ao Délio Duarte, secretário da Pós-graduação do DEA, pela atenção, cordialidade e pelo atendimento sempre que necessário;

Ao professor Carlos Minor Tomiyoshi e às colegas Márcia, Francisca e Nara do Núcleo de Inovação e Transferência de Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) que foram bons amigos, me ajudaram no trabalho de conclusão do curso da graduação e me incentivaram a alçar voo;

Ao amigo e companheiro Emanuel por me aguentar, me proporcionar um lar em Viçosa e ser um sol;

Aos amigos e colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), Ariane, Diego, Emanuel, Grégory, Michael e Vítor por ajudarem a coletar e analisar as amostras de solo e os dados dos sensores portáteis;

A todos os colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA) pela agradável convivência, trocas de ideias e descontração. Especialmente à Priscilla, Juliana e Túlio que me auxiliaram em um momento de saúde debilitada;

À minha família e amigos que estão sempre comigo!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Área de estudo	8
3.2. Variabilidade espacial dos atributos do solo	8
3.2.1. Coleta de dados	8
3.2.1.1. Georreferenciamento dos pontos amostrais	9
3.2.1.2. Medição da condutividade elétrica aparente do solo, da resistência do solo à penetração e da umidade do solo	9
3.2.1.3. Amostras de solo	11
3.2.2. Análise de dados discrepantes	12
3.2.3. Caracterização da variabilidade espacial	12
3.2.4. Correlação de Pearson	13
3.3. Estratégias de amostragem	14
3.3.1. Estratégia de amostragem por zonas de manejo	14
3.3.2. Estratégia de amostragem em malhas	14
3.3.3. Estratégia de amostragem proposta	15
3.3.3.1. Implementação das estratégias de amostragem propostas	15
3.3.3.2. Teste das estratégias propostas	16
3.4. Comparação das estratégias de amostragem	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1. Variabilidade espacial	19
4.2. Comparação das estratégias de amostragem	25
5. CONCLUSÕES	31
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
APÊNDICE A	37
APÊNDICE B	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis utilizadas para definir as zonas de manejo e suas respectivas representações	14
Tabela 2 – Proporções entre os <i>pixels</i> cujos graus de pertinência indicaram certeza e incerteza quanto à classificação	16
Tabela 3 – Estatística descritiva dos dados obtidos em campo.....	19
Tabela 4 – Índice Moran e padrão de agrupamentos dos dados para as variáveis estudadas.	20
Tabela 5 – Quantidade e porcentagem de <i>pixels</i> para os padrões de agrupamento dos dados	22
Tabela 6 – Parâmetros dos modelos teóricos de variância ajustados para as variáveis do solo	23
Tabela 7 – Índices de concordância Kappa entre os mapas das zonas de manejo das variáveis	25
Tabela 8 – Correlações entre as variáveis que delimitaram as zonas de manejo e os atributos do solo	26
Tabela 9 – Índices de concordância Kappa entre os mapas das distintas estratégias de amostragem e os mapas dos atributos do solo	28
Tabela 10 – Estratégias que apresentaram maiores índices de concordância Kappa para cada atributo e quantidade de amostras	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo que compreende uma lavoura de café localizada na Fazenda Braúna município de Araponga, Minas Gerais, Brasil (Fonte: Adaptado de Google Inc., 2013).	8
Figura 2. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos igualmente espaçados (CORWIN; LESH, 2003).	10
Figura 3. Índice de Moran Local para as variáveis: a) altitude, b) CE20, c) CE40, d) umidade, e) resistência do solo à penetração, f) ph, g) fósforo, h) potássio, i) acidez potencial, j) ctc t, k) saturação por bases, l) matéria orgânica, m) fósforo remanescente e n) argila.....	21
Figura 4. Zonas de manejo geradas com base: a) altitude (m); b) condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,20 m (mS m^{-1}); c) condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m (mS m^{-1}); d) umidade do solo (%); e) resistência do solo à penetração (MPa); f) potencial hidrogeniônico; g) fósforo (mg dm^{-3}); h) potássio (mg dm^{-3}); i) acidez potencial (cmolc dm^{-3}); j) capacidade de troca de cátions a pH 7 (cmolc dm^{-3}); k) saturação por bases (%); l) matéria orgânica do solo (dag kg^{-1}); m) fósforo remanescente (mg L^{-1}); n) argila (dag kg^{-1}).....	24

RESUMO

NASCIMENTO, Amélia Laísy do, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2015. **Estratégia de amostragem para caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo.** Orientador: Domingos Sárvio Magalhães Valente. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

Na agricultura de precisão, as variáveis de interesse são analisadas quanto à variabilidade espacial. Desse modo, a amostragem deve ser representativa quanto ao número de pontos e à distribuição dos pontos na área estudada, o que eleva os custos na coleta e análise das amostras. Dessa forma, objetivou-se propor uma estratégia de amostragem que caracterize a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo usando uma menor quantidade de amostras do que a estratégia de amostragem por malha, comumente usada. Para isso, foram propostas 5 estratégias (E1, E2, E3, E4 e E5) que indicaram as posições para coleta das amostras de solo com base nos graus de pertinência dos *pixels* interpolados e classificados em zonas de manejo. O índice de concordância Kappa foi usado para comparar as cinco estratégias de amostragem propostas com as estratégias de amostragem por malha e a dirigida por zonas de manejo. O efeito da diminuição da densidade amostral também foi avaliado nas cinco estratégias propostas e na estratégia de amostragem por malha. A redução da densidade amostral causou diminuição no índice Kappa. Em alguns casos, as estratégias propostas, mesmo usando uma densidade amostral menor, apresentaram índice Kappa maior do que a estratégia de amostragem por malha. No geral, as cinco estratégias propostas apresentaram índices Kappa maiores do que a estratégia de amostragem por malha e dirigida por zonas de manejo. Dentre as cinco estratégias propostas, a estratégia E1 foi a melhor.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Amélia Laísy do, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2015. **Sampling strategy to characterize the spatial variability of soil's physical and chemical attributes.** Advisor: Domingos Sárvio Magalhães Valente. Co-Advisors: Daniel Marçal de Queiroz and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

In precision agriculture the variables of interest are analyzed for spatial variability. Thus, the sampling should be representative relative to number of points and the distribution of points in the study area, which increases costs in the collection and analysis of samples. Therefore, the objective was to propose a sampling strategy that characterizes the spatial variability of soil's physical and chemical properties using fewer samples than the sampling strategy for grid commonly used. For this, five strategies have been proposed (E1, E2, E3, E4 and E5) that indicated the positions for collection of soil samples based on the relevance degree of the interpolated and classified pixels into management zones. The Kappa index was used to compare the five sampling strategies proposed to the sampling strategies by grid and directed by management zones. The effect of the low sample density was also evaluated in the five proposed strategies and grid sampling strategy. The reduction of the sample density caused a decrease in Kappa index. In some cases, the proposed strategies even using a lower sampling density showed Kappa index larger than the grid sampling strategy. Overall, the five proposed strategies showed higher Kappa index than the sampling strategy by grid and directed by management zones. Among the five proposed strategies, the E1 strategy was the best.

1. INTRODUÇÃO

A segurança alimentar é um dos problemas já enfrentados pela população de sete bilhões de pessoas no mundo e há a estimativa de que em 2050 esse número supere os nove bilhões, agravando a situação (UNITED NATIONS, 2013). Para atender à crescente demanda por produtos agrícolas, a produção atual terá que dobrar até 2050. Dessa forma, a pressão sobre os recursos naturais aumentará, provocando uma necessidade de maior eficiência nos sistemas agrícolas e alimentares (GLOBAL HARVEST INITIATIVE, 2014).

Aumentando a quantidade e qualidade das informações sobre a cultura e o solo é possível aumentar a produtividade. Com informações detalhadas, é possível adotar decisões adequadas, para cada local específico, no exato momento em que a ação é necessária, o que corresponde aos princípios da agricultura de precisão (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004).

Na agricultura de precisão (AP), as variáveis de interesse são analisadas quanto à sua distribuição e variabilidade espacial. Para isso, uma amostra deve ser representativa tanto em número de pontos, como em distribuição dos mesmos na área estudada (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Desta forma, a definição do esquema e da densidade de pontos da amostragem é um aspecto importante para a avaliação da variabilidade espacial (DEBIASI et al., 2011).

O aumento da produtividade agrícola e os benefícios ecológicos e ambientais que a agricultura de precisão oferece, têm provocado sua adoção por vários produtores (ZHANG et al., 2002). No Brasil, a agricultura de precisão tem sido adotada, principalmente, quanto à correção do solo, em que a amostragem é realizada em malha com densidades que variam de um ponto a cada três hectares até um ponto a cada cinco hectares (BERNARDI; INAMASU, 2014).

Caon e Genú (2013), mapeando atributos químicos em diferentes densidades amostrais, chegaram ao resultado de que as densidades de uma amostra a cada dois e uma amostra a cada quatro hectares não são

recomendadas para uso em agricultura de precisão. Quantidade inferior a 100 amostras coletadas aumentaram o erro na estimativa de atributos do solo em estudo realizado por Souza et al. (2014) o que reflete, na prática, uma recomendação mínima de 100 pontos para viabilizar o uso da geoestatística.

Embora uma baixa densidade amostral possa não ser eficiente na detecção da variabilidade espacial dos nutrientes no solo, levando-se a uma recomendação não adequada de aplicação de fertilizantes, o uso de um número muito grande de amostras torna o processo demorado e aumenta o custo, o que pode inviabilizar o uso da agricultura de precisão. Um bom sistema de amostragem deve proporcionar uma estimativa com menor custo de amostragem, sem, no entanto, deixar de representar a variabilidade existente no campo de produção.

Técnicas de amostragem dirigida utilizam informações previamente coletadas, tais como mapas de produtividade, fotografias aéreas do solo ou do dossel da cultura, ou medições de condutividade elétrica do solo (LABOSKI; PETERS; BUNDY, 2006). Com essas informações é possível estabelecer zonas de manejo que são áreas que apresentam a mesma combinação de fatores que limitam a produtividade, a mesma eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental podendo serem amostradas como homogêneas (LUCHIARI JUNIOR et al., 2000). Dessa forma, há redução na quantidade de amostras coletadas para análise e, conseqüentemente, diminuição dos custos.

O ideal, porém, seria que a estratégia de amostragem apresentasse qualidade na representação semelhante à oferecida pelo sistema de malhas regulares com alta densidade de pontos além de um baixo custo relacionado à coleta e análises de amostras similar aos praticados com zonas de manejo. Uma possível solução é a indicação do melhor posicionamento dos pontos amostrais considerando informações prévias da área. Dessa forma, objetivou-se propor uma estratégia de amostragem que caracterize a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo usando uma menor quantidade de amostras do que a estratégia de amostragem por malha, comumente usada em trabalhos de agricultura de precisão. Os objetivos específicos foram:

- Determinar a variabilidade espacial da umidade, da resistência à penetração, da condutividade elétrica aparente e de outros atributos físicos e químicos do solo;
- Propor uma estratégia de amostragem para indicar a localização dos pontos de coleta das amostras de solo;
- Comparar a estratégia de amostragem proposta com as estratégias em malha e em zonas de manejo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O manejo de áreas com base na adoção da agricultura de precisão não implica na utilização de tecnologias de automação e controle, pois as decisões podem ser apoiadas por informações obtidas por sensores ou por seres humanos (MCBRATNEY et al., 2005). No entanto, a disponibilidade e acessibilidade à tecnologias, como o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sistemas de controle e aquisição de dados, sensores e atuadores, equipamentos e softwares avançados, entre outros, tem facilitado a aplicação da agricultura de precisão (HEDLEY, 2015; MEDEIROS, 2013; FAIRCHILD, 1988).

Há uma crescente demanda por ferramentas para avaliar o estado da fertilidade do solo, como as técnicas laboratoriais de diagnóstico (testes químicos, físicos e biológicos) e as técnicas de campo (sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e geoestatística). Essas ferramentas têm ajudado o homem a alcançar uma produção agrícola sustentável, em que as decisões sobre o manejo do solo e da cultura são específicas para cada local e são tomadas considerando a variabilidade no padrão de distribuição espacial que as propriedades do solo apresentaram (TRIPATHI et al., 2015; BEHERA; SHUKLA, 2015).

Usando uma combinação de técnicas laboratoriais e de campo, como o eletrocondutímetro e o GPS, Fathi e Mirzanejad (2015) descreveram a variabilidade de alguns indicadores da fertilidade do solo em uma área localizada em Bajgah no Irã. Os autores concluíram que os variogramas são uma ferramenta útil para caracterizar a variabilidade espacial de uma propriedade do solo na presença de um sistema de amostragem irregular. Os mapas gerados podem ser usados para delimitar zonas de manejo, onde em cada área deve ser aplicado um gerenciamento específico com base nos dados da fertilidade do solo.

A elaboração do variograma depende da quantidade de pontos amostrais existentes. Estudos passados indicaram uma quantidade mínima de 150 amostras para que ocorresse o ajuste dos modelos de variograma aos dados e, embora pesquisas mais recentes tentem encontrar uma maneira de reduzir essa quantidade, ainda são necessários pelo menos 100

pontos amostrais para viabilizar o uso da geoestatística (WEBSTER; OLIVER, 1992; SOUZA et al., 2014).

Embora as estimativas geoestatísticas possam apresentar resultados superiores aos demais métodos de interpolação numérica, por usarem a função variograma, quando um modelo de correlação espacial não for obtido pode-se considerar a utilização de métodos de interpolação não estocásticos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). No entanto, entre a utilização de métodos de estimativa geoestatística e de interpolação numérica, alguns trabalhos demonstram que o inverso da distância ponderada – interpolação numérica – pode apresentar resultados mais precisos do que a krigagem – método geoestatístico – na estimativa de alguns atributos do solo (SHAHRIYARI et al., 2013 citado por ABADI; JAFARINIA; VARVANI, 2015; WU; HUNG; PATTON, 2013; JONES et al., 2003).

O inverso da distância ponderada é um método de estimativa determinista, em que os valores dos pontos não medidos são determinados por uma combinação linear dos valores dos pontos mensurados (WU; HUNG; PATTON, 2013). Para estimar os valores nos pontos que não foram coletadas amostras utiliza-se a Equação 1 (DARWISH et al., 2015):

$$Z_{estj} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{(h_{ij} + S)^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{(h_{ij} + S)^p} \right)} \quad (1)$$

em que

Z_{estj} = valor estimado em cada localização j ;

Z_i = valor mensurado nos pontos amostrais i ;

h_{ij} = distância entre Z_{estj} e Z_i ;

S = fator de suavização;

p = fator de ponderação.

O fator de ponderação p define a taxa à qual os pesos diminuem conforme a distância entre os pontos de amostragem e os locais interpolados aumenta. O fator de suavização S reduz a probabilidade do valor de uma amostra influenciar excessivamente um valor interpolado (DARWISH et al., 2015).

Valente et al. (2012) delimitaram zonas de manejo com base em diversos atributos do solo. Um dos resultados obtidos indicou que o valor mínimo do índice de performance *fuzzy* e da entropia da classificação normalizada ocorreu quando foram usadas três zonas de manejo geradas com base na altitude junto à condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,2 m (ZM20A); na altitude junto à condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,4 m (ZM40A); e com a combinação dos três atributos (ZM2040A). Os autores concluíram que as zonas de manejo ZM20A e ZM40A foram a melhor escolha para a classificação das propriedades do solo.

A lógica *fuzzy* reflete a maneira como as pessoas pensam, tentando modelar o seu senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum e como consequência, a introdução da lógica *fuzzy* tem conduzido as pesquisas para sistemas inteligentes mais humanos e mais adequados à realidade (MARRO et al., 2010). Dentre os algoritmos existentes, o *fuzzy k-means* tem sido bastante utilizado (KIDD et al., 2015; YAO et al., 2014; VALENTE et al., 2012). A função objetivo do algoritmo *fuzzy k-means* é descrita na Equação 2 (SONG et al., 2009).

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c m_{ik}^{\phi} d_{(x_i c_k)}^2 \quad (2)$$

sujeito às seguintes condições:

$$\sum_{k=1}^c m_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n m_{ik} > 0 \quad k = 1, 2, \dots, c; \quad (4)$$

$$m_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, c, \quad (5)$$

em que

n = número de dados;

c = número de zonas;

m_{ik} = elemento $\{i, k\}$ da matriz de pertinência;

\emptyset = expoente de ponderação da imprecisão ou fator de nebulosidade;

c_k = vetor que representa o centroide da zona k ;

x_i = vetor que representa o elemento i ;

$d_{(x_i c_k)}^2$ = quadrado da distância entre x_i e c_k .

O fator de nebulosidade (\emptyset) indica o grau de incerteza da solução final e varia de um a ∞ . Quando \emptyset é igual a um, a classificação é considerada rígida e quando \emptyset tende a infinito, a solução se aproxima do seu maior grau de imprecisão (SONG et al., 2009).

Diferente da lógica convencional e da teoria clássica de conjuntos, que dado elemento pertence ou não a um conjunto, a lógica *fuzzy* utiliza a ideia de que todas as coisas admitem graus de pertinências e estes podem variar de zero a um. Esses valores significam, respectivamente, que um elemento não pertence a um determinado conjunto e que um elemento pertence completamente ao conjunto. Valores entre zero e um representam graus parciais de pertinências (MARRO et al., 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo foi uma lavoura de café de 20,2 ha localizada na Fazenda Braúna (20°42'33" S, 42°34'17" W), município de Araponga, Minas Gerais, Brasil (Figura 1). A altitude média do local é de 895 m, o relevo é montanhoso e há predominância, na área, de Latossolo Vermelho Amarelo. A área é cultivada com café da espécie *Coffea arábica* L. e este fora recepado antes da coleta dos dados. Após o corte, os resíduos da cultura permaneceram sobre o solo. As coletas de amostras de solo e as determinações de umidade, condutividade elétrica aparente e resistência à penetração do solo foram realizadas entre os dias 23 a 26 de fevereiro de 2015.

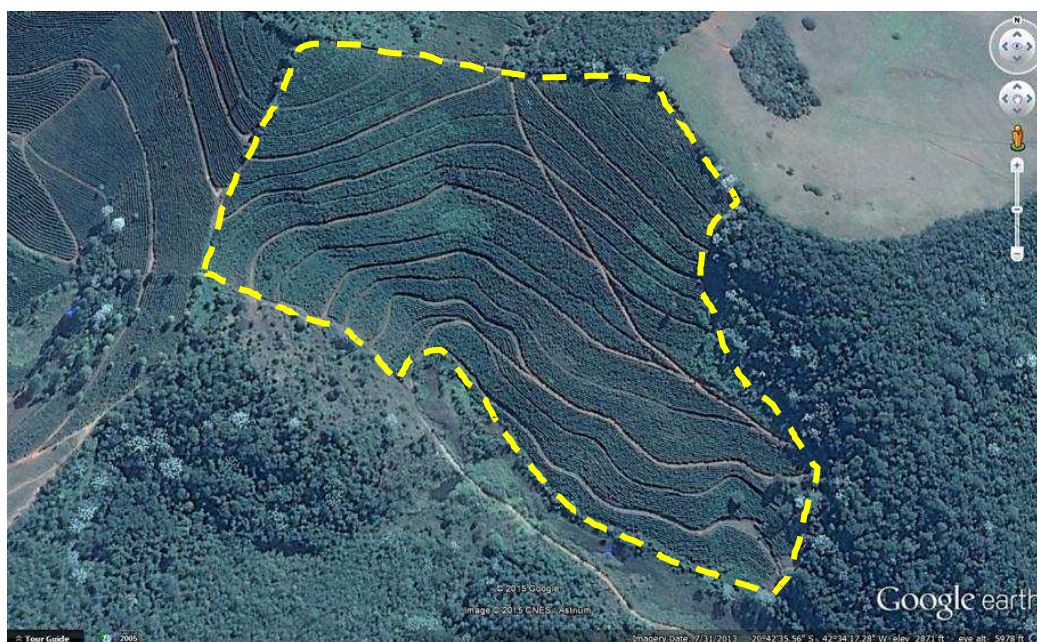


Figura 1. Área de estudo que compreende uma lavoura de café localizada na Fazenda Braúna município de Araponga, Minas Gerais, Brasil (Fonte: Adaptado de Google Inc., 2013).

3.2. Variabilidade espacial dos atributos do solo

3.2.1. Coleta de dados

Inicialmente, foram coletados na área de estudo, os dados de umidade do solo, de resistência do solo à penetração e de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0 a 0,40 m.

Para determinação da variabilidade dos atributos do solo, foram coletadas 275 amostras de solo distribuídas em toda a área.

3.2.1.1. Georreferenciamento dos pontos amostrais

Os pontos de amostragem no campo foram georreferenciados utilizando o GPS Topográfico (L1), da marca Trimble, modelo Pro XT, cuja correção diferencial foi feita utilizando a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada no município de Viçosa-MG. O sistema de coordenadas utilizado foi o UTM com Datum South América 1969 e zona 23S (SAD 69). A correção diferencial foi realizada utilizando o GPS Pathfinder Office ® v. 5.00 fornecido pelo fabricante do aparelho GPS.

3.2.1.2. Medição da condutividade elétrica aparente do solo, da resistência do solo à penetração e da umidade do solo

A condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) foi determinada utilizando o medidor portátil fabricado pela Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02 cuja medição ocorre pelo princípio da resistividade elétrica e representa a CE_a de uma camada do solo, sendo esta medida pelo contato de quatro eletrodos com a superfície do solo. Os eletrodos foram configurados com base na Matriz de Wenner (CORWIN; HEDRICKX, 2002; CORWIN; LESH, 2003), utilizando duas estruturas de suporte constituídas por tubos de PVC e parafusos de aço que funcionaram como os eletrodos (Figura 2). Para a medição da CE_a nas camadas de profundidade de 0 a 0,20 m e de 0 a 0,40 m, o espaçamento entre os eletrodos foi igual a 0,20 m e 0,40 m, respectivamente.

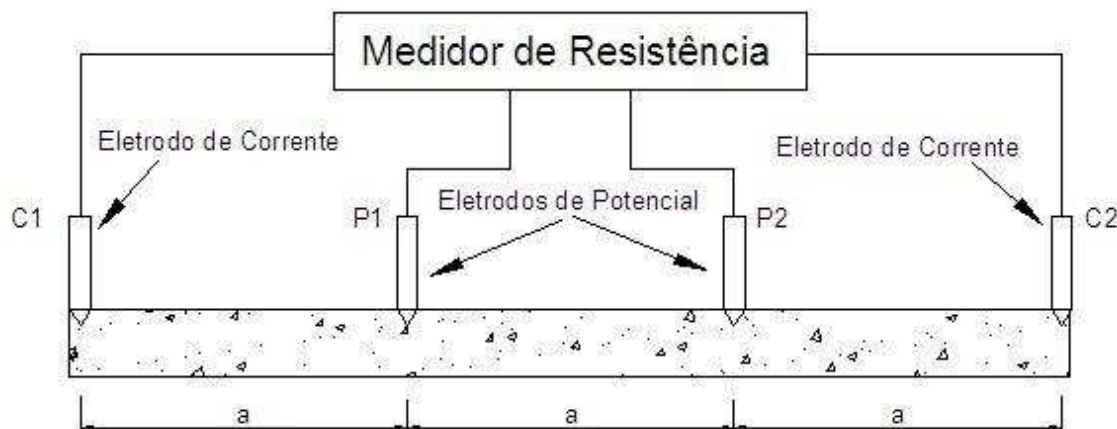


Figura 2. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos igualmente espaçados (CORWIN; LESH, 2003).

A resistência do solo à penetração foi determinada utilizando um penetrômetro de impacto (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983). Determinou-se o número de impactos necessários para o penetrômetro atingir a profundidade mínima de 0,20 m. A resistência do solo à penetração foi calculada de acordo com a Equação 6 (STOLF, 1990).

$$R = \frac{(M + m) g + \frac{M^2 g h}{(M + m)L}}{A} \quad (6)$$

em que

R = resistência do solo à penetração (Pa);

M = massa do corpo que provoca o impacto (kg);

m = massa dos demais componentes do penetrômetro, excluído o corpo de impacto (kg);

g = aceleração da gravidade (m s^{-2});

h = altura de queda da massa que provoca o impacto (m);

L = penetração ocasionada por 1 impacto (m impacto^{-1}); e,

A = área da base do cone (m^2).

A umidade do solo foi determinada utilizando um medidor da marca Spectrum Technologies, modelo FielScout TDR 300, em tempo real, nos mesmos locais onde foram medidas a condutividade elétrica aparente do

solo (CE_a), a resistência do solo à penetração e coletadas as amostras de solo.

3.2.1.3. Amostras de solo

Foi realizada uma amostragem sistemática utilizando uma malha de 25 m × 25 m. No total, foram coletadas 275 amostras distribuídas na área de 20,2 ha. Para isso, foi utilizado um trado do tipo holandês, sendo que cada amostra foi composta por duas subamostras simples na profundidade de 0 a 0,20 m, coletadas em um raio de 1 m ao redor do ponto georreferenciado.

Para análise nesse estudo, foram escolhidos os atributos do solo relacionados à calagem e à adubação de fósforo e potássio de acordo com as recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 2006). Para não restringir a análise das estratégias de amostragem a alguns atributos químicos, foram inclusos ainda, os atributos argila e matéria orgânica.

As amostras de solo foram analisadas em laboratório para obtenção da granulometria e dos atributos pH, fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), acidez potencial (H+Al), fósforo remanescente (P-rem) e matéria orgânica do solo (MO). Em seguida, foram calculados o índice de saturação por bases (V) e a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC T).

Os teores disponíveis de fósforo, potássio e sódio foram determinados pelo extrator Mehlich-1 (MEHLICH, 1984). Os teores trocáveis de cálcio e magnésio foram determinados por meio do extrator KCl (1 mol L^{-1}). A acidez potencial foi determinada usando o extrator acetato de cálcio com concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ à pH 7,0. A porcentagem de matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley-Black. O fósforo remanescente (P-rem) foi determinado usando uma solução de $CaCl_2$ com concentração de 10 mmol L^{-1} . O pH em água foi determinado usando uma relação de uma parte de solo em suspensão em duas partes e meia de água, por meio de potenciômetro com eletrodo combinado. Para obtenção da saturação por bases e da capacidade de troca catiônica à pH 7,0 foi realizado o cálculo conforme descrito no manual de métodos de análise de solo da EMBRAPA

(EMBRAPA, 1997). A granulometria foi determinada pelo método da agitação lenta com dispersante químico NaOH. Após a agitação, foi retirada, por peneiramento, a fração de areia total. Em seguida, houve sedimentação do silte e secagem a 105 °C (RUIZ, 2005a; RUIZ, 2005b).

3.2.2. Análise de dados discrepantes

Considerando a possibilidade de existência de valores atípicos no conjunto de dados, a metodologia de Barnett e Lewis (1994) foi utilizada para verificação e identificação de valores candidatos a *outliers*. Essa análise inicial dos dados coletados resultou na identificação de 15 amostras, no total, com valores discrepantes em relação aos demais dados coletados. Esses 15 pontos foram excluídos e as etapas seguintes foram realizadas com base nos 260 pontos que restaram.

3.2.3. Caracterização da variabilidade espacial

Os dados foram caracterizados pela estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose) e passaram pela análise de dependência espacial realizada com o auxílio do *software* GS+ versão 9.0 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, Plainwell, MI).

O padrão observado de distribuição dos dados foi analisado pelo índice local de Moran univariado. O índice foi calculado com o auxílio do *software* livre GeoDaTM (ANSELIN et al., 2005). A significância dos valores do índice local de Moran foram testados ao nível de 5%. As hipóteses testadas foram as seguintes:

- H_0 : o padrão de distribuição dos dados é aleatório (autocorrelação nula);
- H_{a1} : o padrão de distribuição dos dados é disperso (autocorrelação negativa); e
- H_{a2} : o padrão de distribuição dos dados é agrupado (autocorrelação positiva).

Diversos modelos de semivariograma foram ajustados aos dados e dentre eles, para cada variável estudada, foi escolhido o que apresentou

maior coeficiente de determinação (R^2) e menor valor para a soma do quadrado dos resíduos (SQR). Após análise dos semivariogramas gerados e ajustados no software GS+, verificou-se a existência de dependência espacial para os atributos estudados por meio do índice de dependência espacial (IDE), calculado usando a Equação 7. A variância estrutural (C) e o patamar ($C+C_0$) são parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados.

$$IDE = \frac{C}{(C + C_0)} \times 100 \quad (7)$$

em que

IDE = índice de dependência espacial (%);

C = variância estrutural; e

$C + C_0$ = patamar.

Em seguida, utilizando o *software* gvSIG versão 2.1.0.2269 final (GVSIG ASSOCIATION, 2015) interpolou-se os dados pelo método do inverso do quadrado da distância usando como raio de busca o valor do alcance, para cada atributo, observado nos variogramas. Dessa forma, foram gerados os mapas da variabilidade espacial da altitude, da umidade do solo, da resistência do solo à penetração, da condutividade elétrica aparente e demais atributos do solo.

3.2.4. Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para expressar as relações entre a altitude, a umidade do solo, a resistência do solo à penetração e as condutividades elétrica aparente do solo nas profundidades de 0 a 0,20 m e de 0 a 0,40 m com os demais atributos do solo. No entanto, o cálculo desse coeficiente pressupõe a existência de independência entre os dados analisados. Portanto, para eliminar a dependência espacial existente entre as 260 amostras de solo distribuídas em toda a área de estudo, foram selecionadas aleatoriamente 30 amostras que foram, então, utilizadas na determinação do coeficiente de correlação de Pearson. A significância dos valores calculados foi obtida pelo teste T a 5% de significância.

3.3. Estratégias de amostragem

3.3.1. Estratégia de amostragem por zonas de manejo

As zonas de manejo foram estabelecidas pelo programa computacional KRIG-ME (VALENTE et al., 2012), com base nos mapas gerados pela interpolação dos dados de altitude, umidade, resistência do solo à penetração, teor de argila e condutividade elétrica aparente do solo nas profundidades de 0 a 0,20 m e de 0 a 0,40 m (Tabela 1). A área foi dividida em três zonas de manejo. O tamanho dos *pixels* dos mapas foi de 5 m × 5 m.

Tabela 1 – Variáveis utilizadas para definir as zonas de manejo e suas respectivas representações

Variáveis	Representação
Altitude	ZMA
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,20 m de profundidade	ZM20
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade	ZM40
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade e altitude	ZM40A
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade e resistência do solo à penetração	ZM40RP
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade e umidade do solo	ZM40U
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade, umidade do solo e resistência do solo à penetração	ZM40URP
Condutividade elétrica aparente do solo a 0,40 m de profundidade, umidade do solo, resistência do solo à penetração e altitude	ZM40URPA
Resistência do solo à penetração	ZMRP
Umidade do solo	ZMU

Após o delineamento, foram calculados os valores médios das variáveis para cada zona de manejo. Em seguida, para testar a existência de diferença significativa entre as médias calculadas, foi usado o teste T ao nível de 5% de significância.

3.3.2. Estratégia de amostragem em malhas

Para a amostragem dirigida por malhas regulares, foi realizada uma redução na densidade amostral a partir da quantidade total de amostras

coletadas na área de estudo. Para isso, no *software* gvSIG versão 2.1.0.2269 final (GVSIG ASSOCIATION, 2015), foram geradas as malhas com 25, 50 e 75 pontos ajustados ao polígono de 20,2 hectares que compreende a área de amostragem, identificando quais das amostras distribuídas em toda a área estavam mais próximas aos pontos pertencentes à estas malhas. Os pontos que não foram identificados como mais próximos foram excluídos, gerando as densidades amostrais de 1,24 amostras por hectare, 2,48 amostras por hectare e 3,71 amostras por hectare. Essas densidades são referentes, respectivamente, às quantidades totais de 25, 50 e 75 amostras distribuídas em toda a área de estudo.

3.3.3. Estratégia de amostragem proposta

O programa computacional KRIG-ME (VALENTE et al., 2012), utilizado para definição das zonas de manejo, funciona com base no algoritmo *fuzzy k-means*. A utilização do KRIG-ME gerou uma matriz de pertinência que indica, pelos valores de seus elementos, a que zona de manejo determinado *pixel* pertence. As estratégias de amostragem propostas basearam-se na matriz de pertinência.

3.3.3.1. Implementação das estratégias de amostragem propostas

As estratégias de amostragem propostas foram implementadas em um algoritmo utilizando o *software* Matlab release 12.1 (THE MATHWORKS INC., 2001). Para o desenvolvimento das estratégias de amostragem, os graus de pertinência, gerados previamente pelo *fuzzy k-means*, indicaram as posições onde deveriam ser coletadas as amostras de solo.

A primeira estratégia proposta consistiu em alocar as amostras nos *pixels* cujos graus de pertinência tenderam a um, ou seja, os *pixels* com maior nível de certeza quanto à classificação foram escolhidos como locais a serem amostrados. A segunda estratégia proposta restringiu a alocação das amostras nos *pixels* que apresentaram graus parciais de pertinência, ou seja, foram escolhidos os *pixels* com incerteza quanto à classificação. As terceira, quarta e quinta estratégias propostas compreenderam uma mescla

entre *pixels* que apresentaram certeza e *pixels* com maior nível de incerteza quanto à classificação (Tabela 2).

Tabela 2 – Proporções entre os *pixels* cujos graus de pertinência indicaram certeza e incerteza quanto à classificação

Estratégias	Certeza	Incerteza	Total
E1	100%	0%	100%
E2	0%	100%	100%
E3	80%	20%	100%
E4	50%	50%	100%
E5	20%	80%	100%

3.3.3.2. Teste das estratégias propostas

A escolha das variáveis utilizadas para testar as estratégias de amostragem propostas baseou-se nos resultados do trabalho desenvolvido por Valente et al. (2012) na mesma área de estudo atual. Os autores concluíram que as zonas de manejo, com três classes, geradas com base na altitude junto à condutividade elétrica aparente do solo foram as que melhor representaram a variabilidade espacial dos atributos do solo. Dessa forma, para testar o algoritmo desenvolvido foram utilizadas as zonas de manejo com três classes definidas com base nos dados de altitude e condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m. A profundidade foi escolhida a partir da consideração de que em camadas mais profundas do solo ocorre menor variação temporal nos valores da condutividade elétrica aparente do solo (HARTSOCK et al., 2000).

A amostragem segundo as estratégias propostas ocorreu de maneira semelhante a das malhas regulares: após indicação dos *pixels* e, por consequência, da localização onde as amostras deveriam ser coletadas, foram identificadas, e escolhidas, quais das amostras distribuídas em toda a área estavam mais próximas a esses pontos. O número de pontos escolhidos pela estratégia proposta foi igual aos da amostragem dirigida por malhas regulares.

A utilização do algoritmo com as estratégias propostas resultou na indicação da localização onde as amostras deveriam ser coletadas. No entanto, de acordo com a indicação de quais das amostras distribuídas em toda a área estavam mais próximas a esses pontos, houve uma

sobreposição entre as amostras a serem escolhidas para representar as estratégias propostas. Isto porque, alguns *pixels* selecionados pelas estratégias estavam mais próximos de um mesmo ponto amostral, ou seja, a amostra escolhida para representá-los foi a mesma. Dessa forma, para que as quantidades de amostras utilizadas nos processos seguintes ao algoritmo fossem as estabelecidas, houve a necessidade de compilar novamente o algoritmo, aumentando a quantidade de *pixels* indicados pelas estratégias, até que as quantidades de amostras desejadas fossem alcançadas.

3.4. Comparação das estratégias de amostragem

Os mapas elaborados a partir das informações dadas pelas distintas estratégias de amostragem com menores densidades de pontos foram comparados com o mapa gerado a partir da quantidade total de amostras distribuídas na área de estudo. Essa comparação permitiu estimar o coeficiente de concordância Kappa (Equação 8) com base nos dados da matriz de erros (CONGALTON, 1991).

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})}{n^2 - \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i})} \quad (8)$$

em que

\hat{K} = estimativa do coeficiente Kappa;

x_{ii} = valor na linha i e coluna i (diagonal) da matriz de erros;

$x_{i\oplus}$ = total na linha i;

$x_{\oplus i}$ = total na coluna i;

n = número total de amostras; e

c = número total de zonas.

A variância do coeficiente Kappa foi calculada pela Equação 9, conforme apresentada por Bishop et al. (1975 citados por HUDSON; RAMM, 1987).

$$\hat{\sigma}^2(\hat{K}) = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (9)$$

em que

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c x_{ii} \quad (10)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c (x_{i\oplus} x_{\oplus i}) \quad (11)$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^c x_{ii} (x_{i\oplus} + x_{\oplus i}) \quad (12)$$

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_{ij} (x_{j\oplus} + x_{\oplus j})^2 \quad (13)$$

A diferença entre dois coeficientes Kappa independentes foi testada ao nível de 5% de significância. O valor de Z calculado (Equação 14) que ultrapassou o valor de Z tabelado, correspondente ao nível de significância determinado, refletiu a inexistência de igualdade estatística entre dois coeficientes Kappa, diferenciando-os significativamente entre si. A melhor estratégia de amostragem foi aquela que apresentou maior valor do índice Kappa, seguida pelo menor número possível de pontos amostrais.

$$Z = \frac{\hat{K}_1 - \hat{K}_2}{\sqrt{\hat{\sigma}(\hat{K}_1) + \hat{\sigma}(\hat{K}_2)}} \quad (14)$$

em que

Z = estatística Z padronizada e normalmente distribuída;

\hat{K}_1 e \hat{K}_2 = coeficientes Kappa a serem comparados;

$\hat{\sigma}$ = variância do coeficiente Kappa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variabilidade espacial

Os valores dos dados oscilaram em torno da média de cada variável, entre o mínimo de 4,09% e o máximo de 52,76% (Tabela 3). As menores variabilidades foram observadas nas variáveis altitude e pH, enquanto a saturação por bases, o fósforo e as condutividades elétrica aparente nas profundidades de 0 a 0,40 m (CE40) e de 0 a 0,20 m (CE20) apresentaram, em ordem decrescente, as maiores variabilidades nos dados.

Tabela 3 – Estatística descritiva dos dados obtidos em campo

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Mediana	CV ¹⁵ (%)
Altitude ¹	895,43	36,61	970,05	834,38	895,93	4,09
CE20 ²	1,72	0,77	4,04	0,16	1,54	44,72
CE40 ³	1,53	0,72	3,99	0,18	1,35	47,04
TA ⁴	12,38	2,91	21,20	5,90	12,00	23,52
RP ⁵	1,69	0,66	4,32	0,75	1,56	38,99
pH ⁶	5,58	0,56	7,10	4,25	5,52	9,99
P ⁷	5,26	2,59	15,00	1,40	4,60	49,21
K ⁸	153,02	57,09	325,00	39,00	152,00	37,31
H+Al ⁹	8,31	2,99	14,50	1,30	8,60	36,01
CTC T ¹⁰	12,90	1,90	17,64	7,66	12,98	14,69
V ¹¹	36,27	19,14	89,50	6,90	33,70	52,76
MO ¹²	5,75	1,11	9,78	2,56	5,74	19,21
P-rem ¹³	15,18	4,25	27,40	5,80	15,10	28,02
Argila ¹⁴	52,48	6,37	67,41	36,43	53,04	12,14

¹/ Altitude (m); ²/ CE_a20, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.20 m de profundidade (mS m⁻¹); ³/ CE_a40, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.40 m de profundidade (mS m⁻¹); ⁴/ TA₂, Umidade (%); ⁵/ RP₁, Resistência do solo a penetração (MPa); ⁶/ pH, Acidez Ativa em água; ⁷/ P, Fósforo (mg dm⁻³); ⁸/ K, Potássio (mg dm⁻³); ⁹/ H + Al, Acidez Potencial (cmolc dm⁻³); ¹⁰/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); ¹¹/ V, Saturação por Bases (%); ¹²/ MO, Matéria Orgânica (dag kg⁻¹); ¹³/ P-rem, Fósforo remanescente (mg L⁻¹); ¹⁴/ Argila (dag kg⁻¹) ¹⁵/ CV, Coeficiente de Variação.

O sistema de manejo convencional utiliza a média dos valores da variável como base para o cálculo da necessidade de calagem e adubação do solo. Porém, é perceptível pelos valores mínimos, máximos e respectivos coeficientes de variação, de todas as variáveis analisadas, que algumas regiões da área estudada seriam negligenciadas quanto às doses de insumos realmente necessárias, caso esse sistema de manejo fosse o adotado.

Para todas as variáveis analisadas, o padrão observado de distribuição dos dados foi o agrupado (Tabela 4). Sendo que, em algumas regiões na área estudada, o padrão de agrupamento foi entre *pixels* com valores altos vizinhos a *pixels* que também apresentaram valores altos (Figura 3). Houve ainda, o agrupamento de *pixels* com valores baixos vizinhos a *pixels* que também apresentaram valores baixos.

Tabela 4 – Índice Moran e padrão de agrupamentos dos dados para as variáveis estudadas.

Variável	Índice Moran	Padrão
Altitude ¹	0,998998	Agrupado
CE20 ²	0,938824	Agrupado
CE40 ³	0,943825	Agrupado
TA ⁴	0,940400	Agrupado
RP ⁵	0,946157	Agrupado
pH ⁶	0,965225	Agrupado
P ⁷	0,950696	Agrupado
K ⁸	0,948939	Agrupado
H+Al ⁹	0,962998	Agrupado
CTC T ¹⁰	0,967063	Agrupado
V ¹¹	0,958770	Agrupado
MO ¹²	0,967377	Agrupado
P-rem ¹³	0,966817	Agrupado
Argila ¹⁴	0,955072	Agrupado

¹/ Altitude (m); ²/ CE_a20, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.20 m de profundidade (mS m⁻¹); ³/ CE_a40, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.40 m de profundidade (mS m⁻¹); ⁴/ TA, Umidade (%); ⁵/ RP, Resistência do solo a penetração (MPa); ⁶/ pH, Acidez Ativa em água; ⁷/ P, Fósforo (mg dm⁻³); ⁸/ K, Potássio (mg dm⁻³); ⁹/ H + Al, Acidez Potencial (cmolc dm⁻³); ¹⁰/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); ¹¹/ V, Saturação por Bases (%); ¹²/ MO, Matéria Orgânica (dag kg⁻¹); ¹³/ P-rem, Fósforo remanescente (mg L⁻¹); ¹⁴/ Argila (dag kg⁻¹).

Alguns *pixels* apresentaram resultado não significativo (Figura 3), o que significa que na área ocupada por eles, ocorre um padrão de distribuição aleatório dos dados. Esse fato ocorre quando os valores dos dados de uma variável tendem ao valor da média amostral, pois o Índice de Moran tende a zero e, por consequência, a estatística de teste Z tende a ser menor, aumentando a possibilidade do teste resultar em não significativo.

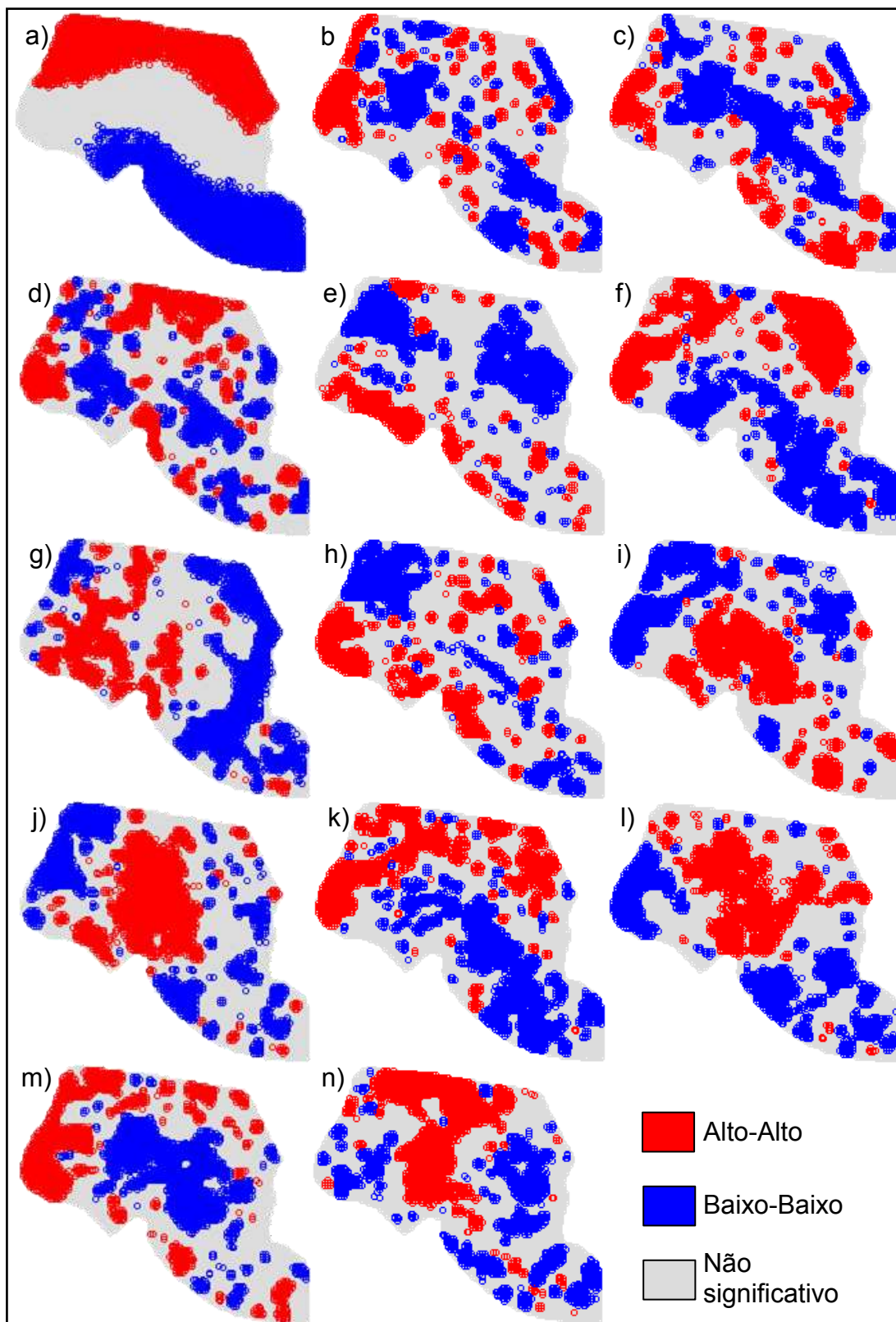


Figura 3. Índice de Moran Local para as variáveis: a) altitude, b) CE20, c) CE40, d) umidade, e) resistência do solo à penetração, f) ph, g) fósforo, h) potássio, i) acidez potencial, j) ctc t, k) saturação por bases, l) matéria orgânica, m) fósforo remanescente e n) argila.

Na prática, é provável que não ocorram problemas de sub ou sobredosagens de insumos na região ocupada pelos *pixels* não significativos (Tabela 5) ao utilizar o sistema convencional para manejar a área. Pois, os dados dos *pixels* não significativos são próximos à média amostral. No entanto, pela análise do índice local de Moran percebemos que, dependendo da variável, uma região que varia entre 31,1% a 53,9% do total da área necessita de um manejo diferenciado, por apresentarem dados significativamente diferentes da média amostral. Ou seja, a variabilidade dos dados, nesse caso, pode justificar a utilização de técnicas de agricultura de precisão.

Tabela 5 – Quantidade e porcentagem de *pixels* para os padrões de agrupamento dos dados

Variável	Padrão agrupado		Padrão aleatório (porcentagem correspondente)
	Alto-Alto	Baixo-Baixo	
Altitude ¹	2218	2340	3904 (46,1%)
CE20 ²	1117	1685	5660 (66,9%)
CE40 ³	1088	1788	5586 (66,0%)
TA ⁴	1499	1548	5415 (64,0%)
RP ⁵	919	1713	5830 (68,9%)
pH ⁶	1846	1979	4637 (54,8%)
P ⁷	1285	2072	5105 (60,3%)
K ⁸	1286	1442	5734 (67,8%)
H+Al ⁹	1665	1660	5137 (60,7%)
CTC T ¹⁰	1892	1535	5035 (59,5%)
V ¹¹	1624	1915	4923 (58,2%)
MO ¹²	1662	1615	5185 (61,3%)
P-rem ¹³	1522	1821	5119 (60,5%)
Argila ¹⁴	1694	1476	5292 (62,5%)

¹/ Altitude (m); ²/ CE_a20, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.20 m de profundidade (mS m⁻¹); ³/ CE_a40, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.40 m de profundidade (mS m⁻¹); ⁴/ TA₂, Umidade (%); ⁵/ RP, Resistência do solo a penetração (MPa); ⁶/ pH, Acidez Ativa em água; ⁷/ P, Fósforo (mg dm⁻³); ⁸/ K, Potássio (mg dm⁻³); ⁹/ H + Al, Acidez Potencial (cmolc dm⁻³); ¹⁰/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); ¹¹/ V, Saturação por Bases (%); ¹²/ MO, Matéria Orgânica (dag kg⁻¹); ¹³/ P-rem, Fósforo remanescente (mg L⁻¹); ¹⁴/ Argila (dag kg⁻¹).

A maioria das variáveis teve seus dados de variância ajustados ao modelo exponencial teórico (Tabela 6). Outros dois modelos também foram ajustados para algumas variáveis: o esférico e o gaussiano. O maior alcance observado foi para o pH enquanto que o ajuste do modelo exponencial aos dados de CE20 apresentou o menor alcance. O valor mínimo alcançado, porém, foi maior do que a distância entre os pontos amostrais, ou seja, a

malha amostral adotada foi suficiente para abranger a dependência espacial das variáveis estudadas.

Tabela 6 – Parâmetros dos modelos teóricos de variância ajustados para as variáveis do solo

Variáveis	Modelo	A ¹⁵	C0+C ¹⁶	C0 ¹⁷	$\frac{C^{18}}{(C0+C)}$	IDE ¹⁹ (%)	RSS ²⁰	R ² ²¹
Altitude ¹	Gaussiano	379,3	2012	1,000	1,000	100	3,9×10 ⁴	0,995
CE20 ²	Exponencial	42,9	0,588	0,061	0,896	89,6	5,9×10 ⁻³	0,716
CE40 ³	Exponencial	94,8	0,504	0,252	0,501	50,1	3,0×10 ⁻³	0,804
TA ⁴	Exponencial	87,0	8,321	4,160	0,500	50,0	5,6×10 ⁻¹	0,829
RP ⁵	Exponencial	311,6	4,981	1,969	0,605	60,5	1,6×10 ²¹	0,981
pH ⁶	Exponencial	585,0	0,376	0,184	0,511	51,1	5,0×10 ⁻⁴	0,984
P ⁷	Exponencial	55,8	6,795	0,870	0,872	87,2	2,6×10 ⁰	0,487
K ⁸	Esférico	139,0	3301	2184	0,338	33,8	2,1×10 ⁵	0,758
H+Al ⁹	Esférico	208,7	9,850	4,920	0,501	50,1	1,2×10 ⁰	0,956
CTC T ¹⁰	Esférico	253,7	4,160	1,627	0,609	60,9	2,6×10 ⁻¹	0,967
V ¹¹	Esférico	173,6	372,0	264,2	0,290	29,0	1,3×10 ³	0,895
MO ¹²	Esférico	289,5	1,398	0,624	0,554	55,4	1,5×10 ⁻²	0,979
P-rem ¹³	Exponencial	160,8	18,97	5,480	0,711	71,1	5,0×10 ⁰	0,956
Argila ¹⁴	Exponencial	201,0	42,75	21,37	0,500	50,0	3,4×10 ¹	0,878

¹/ Altitude (m); ²/ CE_a20, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.20 m de profundidade (mS m⁻¹); ³/ CE_a40, Condutividade Elétrica Aparente do solo à 0.40 m de profundidade (mS m⁻¹); ⁴/ TA, Umidade (%); ⁵/ RP, Resistência do solo a penetração (MPa); ⁶/ pH, Acidez Ativa em água; ⁷/ P, Fósforo (mg dm⁻³); ⁸/ K, Potássio (mg dm⁻³); ⁹/ H + Al, Acidez Potencial (cmolc dm⁻³); ¹⁰/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); ¹¹/ V, Saturação por Bases (%); ¹²/ MO, Matéria Orgânica (dag kg⁻¹); ¹³/ P-rem, Fósforo remanescente (mg L⁻¹); ¹⁴/ Argila (dag kg⁻¹) ¹⁵/ A, Alcance; ¹⁶/ C0 + C, Patamar; ¹⁷/ C0, Efeito pepita; ¹⁸/ C/(C0+C), Proporção; ¹⁹/ IDE, Índice de Dependência Espacial; ²⁰/ RSS, Resíduo; ²¹/ R², Coeficiente de determinação.

Segundo a classificação pelo índice de dependência espacial (IDE) proposta por Zimback (2001), a maioria das variáveis analisadas apresentou moderada dependência espacial (25%<IDE<75%). As exceções foram nos dados de altitude, CE20 e fósforo que apresentaram forte dependência espacial (IDE≥75%).

A variabilidade dos dados foi suficiente para promover diferença significativa entre as médias dos dados nas zonas de manejo geradas, considerando todas as variáveis analisadas (Figura 4). Cada variável utilizada para delinear as zonas de manejo causou um padrão de variação distinto nas áreas que compreenderam cada zona. No entanto, foi comum para a maioria das zonas de manejo, a presença de fragmentos de área classificados de uma forma envolvidos por áreas com classificação distinta. Essa descontinuação nas áreas que cada zona de manejo ocupou pode ter relação com o alcance da dependência espacial das variáveis.

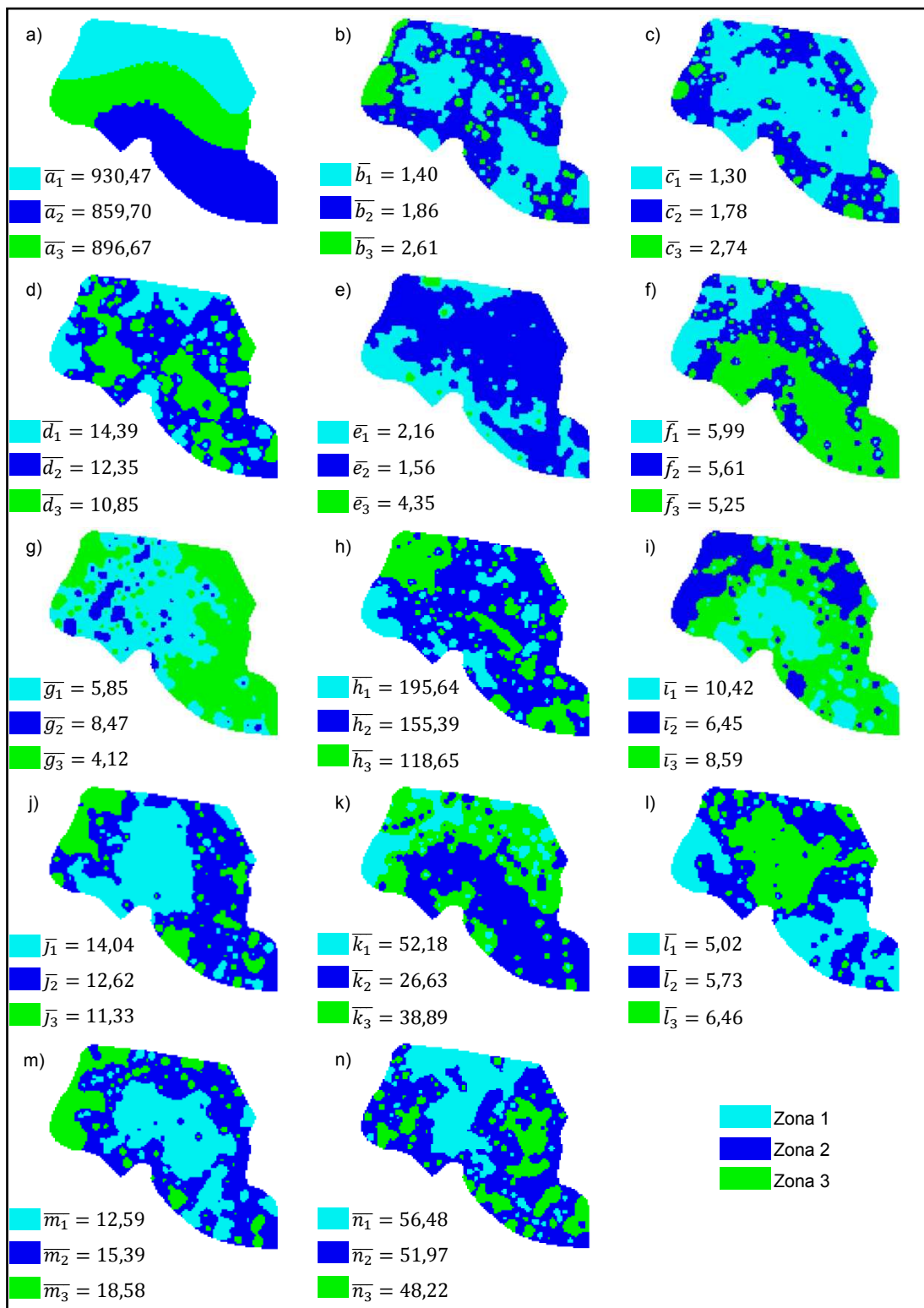


Figura 4. Zonas de manejo geradas com base: a) altitude (m); b) condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,20 m (mS m⁻¹); c) condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m (mS m⁻¹); d) umidade do solo (%); e) resistência do solo à penetração (MPa); f) potencial hidrogeniônico; g) fósforo (mg dm⁻³); h) potássio (mg dm⁻³); i) acidez potencial (cmolc dm⁻³); j) capacidade de troca de cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); k) saturação por bases (%); l) matéria orgânica do solo (dag kg⁻¹); m) fósforo remanescente (mg L⁻¹); n) argila (dag kg⁻¹).

4.2. Comparação das estratégias de amostragem

A comparação entre o mapa das zonas de manejo geradas com base nos dados de altitude e o mapa das zonas de manejo do pH foi a que apresentou o maior índice Kappa entre as demais variáveis e zonas de manejo (Tabela 7). O maior grau de associação entre a altitude e o pH do solo (Tabela 8), pode ter sido a causa do maior índice Kappa, dentre as demais comparações, entre as zonas de manejo geradas com base em informações previamente coletadas e as zonas de manejo geradas com base nas informações reais dos atributos do solo.

Tabela 7 – Índices de concordância Kappa entre os mapas das zonas de manejo das variáveis

Zonas de manejo*	pH ¹¹	P ¹²	K ¹³	H+Al ¹⁴	CTC T ¹⁵	V ¹⁶	MO ¹⁷	P-rem ¹⁸	Argila
ZMA ¹	0,46 ^{A**}	0,09 ^A	0,11 ^A	0,26 ^A	0,11 ^A	0,28 ^A	0,19 ^A	0,18 ^A	0,13 ^A
ZMCE20 ²	0,19 ^B	0,02 ^B	0,16 ^B	0,17 ^B	0,06 ^B	0,30 ^A	0,11 ^B	0,26 ^B	0,00 ^{NS}
ZMCE40 ³	0,04 ^C	0,05 ^C	0,04 ^C	0,05 ^C	0,08 ^C	0,14 ^B	0,11 ^B	0,22 ^C	0,06 ^B
ZMCE40A ⁴	0,36 ^D	0,02 ^{NS}	0,14 ^B	0,15 ^D	0,09 ^A	0,45 ^C	0,11 ^B	0,16 ^A	0,13 ^A
ZMCE40P ⁵	0,03 ^C	0,06 ^C	0,08 ^D	0,09 ^E	0,10 ^A	0,06 ^D	0,16 ^C	0,15 ^A	-0,03 ^C
ZMCE40U ⁶	0,14 ^D	0,02 ^B	0,16 ^B	0,17 ^B	0,09 ^A	0,26 ^E	0,10 ^B	0,27 ^D	0,06 ^B
ZMCE40UP ⁷	0,11 ^E	0,04 ^B	0,09 ^D	0,13 ^F	0,10 ^A	0,14 ^B	0,13 ^D	0,18 ^E	0,02 ^D
ZMCE40UPA ⁸	0,38 ^D	0,03 ^B	0,10 ^D	0,18 ^G	0,06 ^B	0,40 ^F	0,15 ^C	0,18 ^A	0,06 ^B
ZMP ⁹	0,07 ^F	0,10 ^A	0,08 ^D	-0,04 ^H	0,06 ^B	0,05 ^D	0,11 ^B	0,12 ^F	-0,03 ^C
ZMU ¹⁰	0,21 ^G	0,01 ^{NS}	0,16 ^B	0,21 ^A	0,05 ^B	0,24 ^E	0,07 ^E	0,24 ^B	0,07 ^B

* / Zonas de manejo geradas com base na: ^{1/} altitude; ^{2/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,20 m; ^{3/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m; ^{4/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m e altitude; ^{5/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m e resistência do solo à penetração; ^{6/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m e umidade do solo; ^{7/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m, umidade do solo e resistência do solo à penetração; ^{8/} condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m, teor de água, resistência do solo a penetração e altitude; ^{9/} resistência à penetração; ^{10/} teor de água do solo; ^{11/} pH, Acidez Ativa em água; ^{12/} P, Fósforo; ^{13/} K, potássio; ^{14/} H+Al, Acidez Potencial; ^{15/} CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7; ^{16/} V, Saturação por Bases; ^{17/} MO, Matéria Orgânica; ^{18/} P-rem, Fósforo remanescente. ** Valores seguidos de letras diferentes, na coluna, diferem estatisticamente pelo teste Z a 5% de significância, ^{NS} corresponde a não significativo.

Tabela 8 – Correlações entre as variáveis que delimitaram as zonas de manejo e os atributos do solo

Variáveis	pH ⁶	P ⁷	K ⁸	H+Al ⁹	CTC T ¹⁰	V ¹¹	MO ¹²	P-rem ¹³	Argila ¹⁴
Altitude ¹	0,504**	-0,065	-0,427**	-0,338	-0,106	0,401**	0,280	0,274	0,115
CE20 ²	0,343	0,248	0,419**	-0,233	0,150	0,411**	-0,053	0,414**	0,274
CE40 ³	0,154	0,090	0,372**	-0,177	0,045	0,231	-0,161	0,344**	-0,105
TA ⁴	0,220	0,106	0,329	-0,178	0,131	0,321	-0,111	0,388	0,211
RP ⁵	-0,133	0,118	0,093	-0,037	-0,126	-0,031	-0,339	0,264	0,071

¹/ Altitude (m); ²/ CE_a20, Condutividade Elétrica Aparente do solo a 0.20 m de profundidade (mS m⁻¹); ³/ CE_a40, Condutividade Elétrica Aparente do solo a 0.40 m de profundidade (mS m⁻¹); ⁴/ TA, Umidade (%); ⁵/ RP, Resistência do solo a penetração (MPa); ⁶/ pH, Acidez Ativa em água; ⁷/ P, Fósforo (mg dm⁻³); ⁸/ K, Potássio (mg dm⁻³); ⁹/ H + Al, Acidez Potencial (cmolc dm⁻³); ¹⁰/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); ¹¹/ V, Saturação por Bases (%); ¹²/ MO, Matéria Orgânica (dag kg⁻¹); ¹³/ P-rem, Fósforo remanescente (mg L⁻¹); ¹⁴/ Argila (dag kg⁻¹); **/ Significativo a 5%.

De maneira geral, houve diminuição nos índices de concordância Kappa entre as zonas de manejo e os atributos do solo conforme a correlação entre as variáveis que delimitaram as zonas de manejo e os atributos do solo decresceu. Isso ocorre, provavelmente, devido à existência de correlação espacial entre as variáveis previamente coletadas e os atributos do solo, além da correlação entre os valores numéricos.

A condutividade elétrica aparente na profundidade de 0 a 0,20 m (CE20) apresentou as maiores correlações entre cinco atributos, porém, as zonas de manejo geradas com base na CE20 (ZMCE20) apresentaram maior índice Kappa apenas para um atributo, o potássio. O baixo valor do alcance da dependência espacial da CE20 pode ter causado, no mapa, a presença de uma maior quantidade de fragmentos com classificações distintas, diminuindo a possibilidade de concordância entre os *pixels* dos mapas comparados.

Ao utilizarem zonas de manejo delimitadas com base na altitude e condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m, Alves et al. (2013) observaram valores, aproximados, do índice Kappa de 0,37, 0,24 e 0,11 para os atributos capacidade de troca de cátions, argila e acidez potencial, respectivamente. Esses índices foram maiores do que os encontrados no presente estudo com exceção da acidez potencial, cujo índice foi menor. O mapa referencial utilizado pelos autores foi gerado com base em uma quantidade de 120 amostras distribuídas na área enquanto, no presente estudo, foram utilizadas 260 amostras resultantes do processo de

exclusão dos dados discrepantes. Essa quantidade distinta de amostras, entre os dois trabalhos, pode ter influenciado os resultados obtidos, pois, a maior quantidade de pontos amostrais pode caracterizar a variabilidade espacial dos atributos de maneira mais precisa e, no cálculo do índice Kappa, haver menos concordância entre os mapas comparados.

As zonas de manejo ZMA, ZMCE40A e ZMCE40UPA, quanto à concordância com a variabilidade do pH, e as zonas ZMA, ZMCE20, ZMCE40A e ZMCE40UPA, em relação à concordância com a variabilidade da saturação de bases, apresentaram índices Kappa iguais ou maiores do que as malhas com densidade de 1,24 amostras/ha ou com densidade de 2,48 amostras/ha (Tabela 9). Para o caso da concordância com o fósforo remanescente, todas as zonas de manejo estudadas apresentaram índices Kappa maiores ou iguais ao índice Kappa da malha com densidade de 1,24 amostras/ha. Esse fato indica que para o manejo da área de acordo com a variabilidade espacial do pH, da saturação por bases ou do fósforo remanescente, as referidas zonas de manejo ofereceram resultados iguais ou melhores do que os resultados apresentados pelas malhas com densidades de 1,24 ou 2,48 amostras/ha, com a vantagem de utilizar menos amostras para caracterizar a área. No entanto, na prática, para uma zona de manejo ser útil, a área delimitada por cada zona deve apresentar concordância com a maioria das variáveis a serem manejadas na área e não apenas com uma ou duas variáveis, como foi o caso dessas referidas zonas.

Tabela 9 – Índices de concordância Kappa entre os mapas gerados com base em distintas estratégias de amostragem e os mapas dos atributos do solo

		pH ¹	P ²	K ³	H+Al ⁴	CTC T ⁵	V ⁶	MO ⁷	P- rem ⁸	Argila
1,24 amostras/ha	E1	0,47 ^A	0,43 ^A	0,20 ^A	0,31 ^A	0,28 ^A	0,39 ^A	0,26 ^A	0,16 ^A	0,23 ^A
	E2	0,31 ^B	0,35 ^B	0,16 ^B	0,08 ^B	0,22 ^B	0,21 ^B	0,27 ^A	0,13 ^B	0,29 ^B
	E3	0,40 ^C	0,36 ^B	0,17 ^B	0,19 ^C	0,28 ^A	0,33 ^C	0,28 ^B	0,17 ^A	0,14 ^C
	E4	0,37 ^D	0,26 ^C	0,13 ^C	0,13 ^D	0,18 ^C	0,20 ^B	0,21 ^C	0,14 ^A	0,20 ^D
	E5	0,32 ^B	0,29 ^D	0,18 ^A	0,13 ^D	0,16 ^D	0,15 ^D	0,31 ^D	0,16 ^A	0,30 ^B
	Malha	0,24 ^E	0,40 ^E	0,18 ^A	0,35 ^F	0,30 ^E	0,29 ^E	0,27 ^A	0,13 ^B	0,23 ^A
2,48 amostras/ha	E1	0,52 ^F	0,44 ^A	0,29 ^D	0,20 ^C	0,32 ^F	0,46 ^F	0,33 ^E	0,29 ^C	0,40 ^E
	E2	0,33 ^G	0,37 ^B	0,22 ^A	0,17 ^G	0,34 ^G	0,31 ^G	0,31 ^D	0,29 ^C	0,39 ^E
	E3	0,50 ^H	0,43 ^A	0,34 ^E	0,31 ^A	0,38 ^H	0,43 ^H	0,37 ^F	0,25 ^D	0,35 ^F
	E4	0,37 ^D	0,40 ^E	0,36 ^E	0,25 ^H	0,29 ^A	0,37 ^I	0,35 ^G	0,32 ^E	0,29 ^B
	E5	0,49 ^H	0,39 ^E	0,29 ^D	0,23 ^H	0,45 ^I	0,28 ^E	0,34 ^E	0,34 ^F	0,33 ^F
	Malha	0,43 ^I	0,40 ^E	0,32 ^E	0,28 ^I	0,38 ^H	0,31 ^G	0,38 ^F	0,41 ^G	0,39 ^E
3,71 amostras/ha	E1	0,58 ^J	0,53 ^F	0,36 ^E	0,49 ^J	0,44 ^I	0,52 ^K	0,43 ^H	0,33 ^E	0,41 ^E
	E2	0,43 ^I	0,37 ^B	0,24 ^F	0,30 ^A	0,48 ^J	0,46 ^F	0,39 ^I	0,37 ^H	0,36 ^F
	E3	0,53 ^F	0,48 ^G	0,41 ^G	0,29 ^I	0,47 ^J	0,50 ^L	0,37 ^F	0,39 ^I	0,43 ^G
	E4	0,49 ^H	0,49 ^G	0,40 ^G	0,43 ^K	0,51 ^K	0,47 ^F	0,39 ^I	0,34 ^F	0,47 ^H
	E5	0,46 ^A	0,42 ^A	0,38 ^H	0,28 ^I	0,52 ^K	0,37 ^I	0,56 ^J	0,28 ^C	0,40 ^E
	Malha	0,53 ^F	0,53 ^F	0,34 ^E	0,42 ^K	0,54 ^L	0,51 ^K	0,45 ^K	0,59 ^J	0,38 ^I

¹/ pH, Acidez Ativa em água; ²/ P, Fósforo; ³/ K, potássio; ⁴/ H+Al, Acidez Potencial; ⁵/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7; ⁶/ V, Saturação por Bases; ⁷/ MO, Matéria Orgânica; ⁸/ P-rem, Fósforo remanescente. * Valores seguidos pelas mesmas letras, na linha e na coluna, não diferem entre si pelo teste Z a 5% de significância.

Para a maioria das variáveis analisadas, houve decréscimo nos valores do Kappa conforme a densidade de pontos foi reduzida para realização da interpolação dos dados de atributos. Essa diminuição nos valores do índice Kappa causada pela redução da densidade de pontos também foi observada por Nanni et al. (2011) e por Caon e Genú (2013). O que ocorre ao diminuir a quantidade de amostras para gerar os mapas, é que zonas que ocupam porções menores do terreno são envolvidas por zonas mais abundantes e perdem representatividade até deixarem de existir

(CAON; GENÚ, 2013). Esse detalhamento dos padrões de variação dos mapas das zonas de manejo de argila também diminuiu com a redução da densidade de amostragem no estudo realizado por Souza et al. (2014).

Para a densidade de 1,24 amostras/ha, a estratégia E1 apresentou valores do índice de concordância Kappa maior do que a malha com densidade de 2,48 amostras/ha para 3 atributos: pH, fósforo e saturação por bases. A estratégia E2, com densidade de 1,24 amostras/ha, também exibiu um índice Kappa maior do que a malha com densidade de 2,48 amostras/ha quanto à saturação de bases, no entanto, o valor foi menor do que o da estratégia E1 com a mesma densidade amostral.

Quanto à densidade de 2,48 amostras/ha, a estratégia E1 e a malha expressaram índices Kappa iguais ou superiores ao da malha com densidade de 3,71 amostras/ha para dois atributos cada uma: pH para a estratégia E1, potássio para a malha e argila para ambas as estratégias. As estratégias propostas E3 e E4, com densidade de 2,48 amostras/ha, exibiram índices Kappa iguais ao da malha com densidade de 3,71 amostras/ha para o atributo potássio. A estratégia E2, utilizando uma densidade de 2,48 amostras/ha para caracterizar a variabilidade espacial, expôs um índice Kappa maior do que a malha com densidade de 3,71 amostras/ha, quanto ao atributo argila. A utilização dessas estratégias propostas que apresentaram índices Kappa maiores, usando uma densidade amostral menor, do que a estratégia de amostragem por malhas revelou a possibilidade de redução de custos relativos à amostragem e análise das amostras.

Entre todas as densidades analisadas, a densidade amostral de 3,71 amostras/ha apresentou os maiores índices de concordância Kappa. Destaca-se que, respectivamente às densidades amostrais de 1,24, 2,48 e 3,71 amostras/ha, as estratégias propostas E1, E2, E3, E4 e E5, juntas, apresentaram maior índice Kappa em relação à concordância com treze, dez e oito atributos do solo enquanto a malha regular (M) apresentou índice Kappa maior em apenas três, três e quatro atributos (Tabela 10). Esses valores contabilizam os casos em que mais de uma estratégia apresentaram-se com os maiores índices Kappa de maneira estatisticamente iguais.

Tabela 10 – Estratégias que apresentaram maiores índices de concordância Kappa para cada atributo e densidade amostral

Densidade amostral	pH ¹	P ²	K ³	H+Al ⁴	CTC T ⁵	V ⁶	MO ⁷	P-rem ⁸	Argila	E×M*
1,24 amostras/ha	E1	E1	E1/E5/M	M	E3/M	E1	E5	E1/E3/E4/E5	E2/E5	13×3
2,48 amostras/ha	E1	E1/E3	E4	E3	E5	E1	E3/M	M	E1/E2/M	10×3
3,71 amostras/ha	E1	E1/M	E3/E4	E1	M	E1/M	E5	M	E4	8×4

¹/ pH, Acidez Ativa em água; ²/ P, Fósforo; ³/ K, potássio; ⁴/ H+Al, Acidez Potencial; ⁵/ CTC T, Capacidade de Troca de Cátions a pH 7; ⁶/ V, Saturação por Bases; ⁷/ MO, Matéria Orgânica; ⁸/ P-rem, Fósforo remanescente. * Quantidade de vezes que as estratégias propostas (E) e as malhas (M) apresentaram maior índice Kappa.

Considerando apenas as estratégias propostas, a estratégia E1 apresentou maior concordância com os mapas de cinco atributos, para o caso da densidade amostral de 1,24 amostras/ha, e de quatro atributos, para as densidades de 2,48 amostras/ha e de 3,71 amostras/ha. Ou seja, a estratégia E1 – que utiliza os *pixels* com maior nível de certeza quanto à classificação – foi a melhor entre as estratégias propostas. Em contrapartida, a estratégia E2 – que utiliza os *pixels* com maior nível de incerteza quanto à classificação – mostrou ter a maior concordância com apenas um atributo analisado em relação às densidades de 1,24 amostras/ha e 2,48 amostras/ha, enquanto que, para a densidade de 3,71 amostras/ha, a estratégia E2 não mostrou ter a maior concordância para qualquer um dos atributos analisados.

Os resultados obtidos indicam que as estratégias propostas, em especial a E1, foram melhores do que as malhas regulares embora as variáveis usadas para delimitar as zonas de manejo que serviram como base das estratégias não tenham apresentado alta correlação com as demais variáveis do solo. É possível que, ao utilizar variáveis com alta correlação, os índices Kappa alcancem valores maiores.

5. CONCLUSÕES

A definição da quantidade de pontos amostrais e sua distribuição na área estudada promoveram uma amostragem representativa, detectando a dependência espacial de todos os atributos do solo analisados.

As variáveis altitude, condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,2 m e fósforo apresentaram forte dependência espacial. Enquanto as variáveis condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0 a 0,4 m, umidade do solo resistência do solo à penetração, pH, potássio, acidez potencial, capacidade de troca de cátions à pH 7,0, saturação por bases, matéria orgânica do solo, fósforo remanescente e argila apresentaram moderada dependência espacial.

Para todas as variáveis, a variabilidade dos dados foi suficiente para promover diferença significativa entre as médias dos dados nas zonas de manejo.

Todas as cinco estratégias propostas apresentaram índices Kappa maiores do que as malhas regulares, para pelo menos uma variável e uma densidade amostral.

Dentre as estratégias propostas, a estratégia E1, que utiliza os *pixels* com maior nível de certeza quanto à classificação, foi a melhor, enquanto a estratégia E2, que utiliza os *pixels* com maior nível de incerteza quanto à classificação, foi a pior.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADI, K. M., JAFARINA, R., VARVANI, J.. Analyzing Kriging and CoKriging Methods by using ArcGIS Software in Preparing SP map of Farahan Plain Soil. **Biological Forum – An International Journal**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 836 – 846, 2015.

ALVES, S. M. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.. Definição de Zonas de Manejo a Partir de Mapas de Condutividade Elétrica e Matéria Orgânica. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 1, p.104-114, jan./fev. 2013.

ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y.. GeoDa: An introduction to spatial data analysis. **Geographical Analysis**, Columbus, v. 38, n. 1, p. 5-22, jan. 2005.

BARNETT, V.; LEWIS, T.. **Outliers in Statistical Data**, 3rd edn. Hoboken: John Wiley & Sons. 1994.

BEHERA, S. K.; SHUKLA, A. K.. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of Índia. **Land Degradation & Development**, [S.l.], local, v. 26, p. 71–79, jan. 2015.

BERNARDI, A. C. de C.; INAMASU, R. Y. Adoção de agricultura de precisão em algumas das principais regiões agrícolas brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – CONBAP, 6., 2014, São Pedro. **Anais eletrônicos...** São Pedro: SBEA, 2014.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 359-387, ago. 2004.

CAON, D.; GENÚ, A. M. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.6, p. 629-639, jun. 2013.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, New York, v.37, n.1, p.35-46, jul. 1991.

CORWIN, D. L.; HENDRICKX, J. M. H.. Electrical resistivity: Wenner Array. In: SILVA, J. S.. **Methods of soil analysis part 4 physical methods**. Madison: Soil Science Society of America Book Series, 2002. v.5, p.1282 – 1287.

CORWIN, D. L.; S. M. LESCH. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, [S.l.], v.95, n.3, p.455-471, mai./jun. 2003.

DARWISH, Kh. M.; RASHAD, M.; MOHAMED, S. Z.; GAD, A. Spatial distribution analysis of soil variables for agronomic development in El-Omayed Area, North-Coastal of Egypt. **Environ Earth Sci.**, [S.l.], v. 74, n. 1, p. 889–901, jul. 2015.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; OLIVEIRA, F. A.; MACHADO, T. M. Ajuste de grades amostrais para o mapeamento da resistência à penetração de um Latossolo Bruno. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Eds.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 138-142.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997. 212p.

FAIRCHILD D.S. Soil information system for farming by kind of soil. In: INTERNATIONAL INTERACTIVE WORKSHOP ON SOIL RESOURCES: THEIR INVENTORY, ANALYSIS AND INTERPRETATIONS FOR USE IN THE 1990's, 1988, Minneapolis. **Proceedings...** St Paul: University of Minnesota, 1988. p. 159–164.

FATHI, H.; MIRZANEJAD, M. Spatial Variability of Agricultural Characteristic to Evaluate Productivity Potencial in Iran. **Journal of Environmental Science and Technology**, [S.l.], v.8, n. 1, p. 13 – 24, jan./fev. 2015.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+ for Windows**. Version 9.0. Michigan: Gamma Design Software, 2008.

GLOBAL HARVEST INITIATIVE. **Global revolutions in agriculture: the challenge and promise of 2050**. Washington: Global Harvest Initiative, 2014. 68 f. (2014 GAP Report[®]).

GOOGLE INC. Google Earth. Versão 7.1.2.2041. [Mountain View]: Google Inc., 2013.

GVSIG ASSOCIATION. gvSIG, versão 2.1.0.2269 final, Valencia: Gvsig Association, 2015.

HARTSOCK, N. J.; MUELLER, T. G.; THOMAS, G. W.; BARNHISEL, R. I.; WELLS, K. L.; SHEARER, S. A. Soil electrical conductivity variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings...** CD-ROM. Madison: ASACSSA-SSSA, 2000.

HEDLEY C.. The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [S.l.], v. 95, n. 1, p. 12–19, jan. 2015.

HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric engineering & remote sensing**, Bethesda, v.53 n.4, p.421-422, abr. 1987.

JONES, N. L.; DAVIS, R. J.; SABBAH, W.. A comparison of threedimensional interpolation techniques for plume characterization. **Ground Water**, [S.l.], v.41, p.411-419, jul. 2003.

KIDD, D.; MALONE, B.; MCBRATNEY, A.; MINASNY, B.; WEBBA, M. Operational sampling challenges to digital soil mapping in Tasmania, Australia. **Geoderma Regional**, [S.l.], v. 4, p. 1–10, abr. 2015.

LABOSKI, C. A. M.; PETERS, J. B.; BUNDY, L. G. **Nutrient application guidelines for field vegetable and fruit crops in Wisconsin**. [S. l.]: Uwex Pub. A2809. Univ. Of Wisconsin-extension, 2006. 70 p.

LUCHIARI JÚNIOR, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, A.; PAYTON, S. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings...** Minneapolis: University of Minnesota, 2000.

MARRO, A. A., SOUZA, A. M. C., CAVALCANTE, E. R. S., BEZERRA, G. S., NUNES, R. O. **Lógica Fuzzy: conceitos e aplicações**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2010.

MCBRATNEY, A., WHELAN, B., ANCEV, T., BOUMA, J.. Future Directions of Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, [S.l.], v.6, p. 7-23, fev. 2005.

MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R.. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 37, p. 617-639, dez. 1986.

MEDEIROS, W. N. **Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica aparente do solo obtida por sensor portátil de contato direto**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, [S.l.], v. 15, n. 12, p. 1417-1422, dez. 1984.

NANNI, M. R.; POVH, F. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; OLIVEIRA, R. B.; CHICATI, M. L.; CEZAR, E.. Optimum size in grid soil sampling for variable

rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.68, p.386-392, jun. 2011.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. eds. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. 1. Ed. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. 359p.

RUIZ, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 30, 2005, Recife. **Anais...** Recife: UFRPE, SBCS, 2005a. CD ROM.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 297-300, abr. 2005b.

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**, [S.l.], v. 10, n. 6, p. 471-487, dez. 2009.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261-268, fev. 2014.

STOLF, R. Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/SBEA, 1990. p.823 – 836.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. An impact penetrometer model to determine the deep tillage in sugarcane áreas. In: CONGRESS OF THE ISSCT, 18., 1983, La Habana. **Proceedings...** [S. l.]: ISSCT, [1983]. p.544 – 550

THE MATHWORKS INC. Matlab: The language of technical computing. Release 12.1. Natick: The MathWorks Inc., 2001.

TRIPATHI, R.; NAYAKA, A. K.; SHAHID, M.; LAL, B.; GAUTAMA, P.; RAJA, R.; MOHANTY, S.; KUMAR, A.; PANDA, B. B.; SAHOOB, R. N. Delineation of soil management zones for a rice cultivated area in eastern India using *fuzzy* clustering. **Catena**, [S.l.], v. 133, p. 128–136, out. 2015.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The 2012 Revision, Key Findings and Advance Tables**. New York: United Nations, 2013. 54f. (Working Paper No. ESA/P/WP.227).

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L.. Definition of management zones in coffee production

fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 69, n. 3, p.173-179, mai./jun. 2012.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A.. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 43, n. 1, p. 117-192, mar. 1992.

WU, Y. H; HUNG, M. C; Patton J.. Assessment and visualization of spatial interpolation of soil pH values in farmland. **Precision Agriculture**, [S.l.], v. 14, n. 6, p. 565 – 585, dez. 2013.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

YAO, R. J.; YANGA, J. S.; ZHANG, T. J.; GAO, P.; WANG, X. P.; HONG, L. Z.; WANG, M. W.. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. **Geoderma**, [S.l.], v. 232–234, p. 381–393, nov. 2014.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture: a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v.36, n. 2 – 3, p.113 – 132, nov. 2002.

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 fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

APÊNDICE A

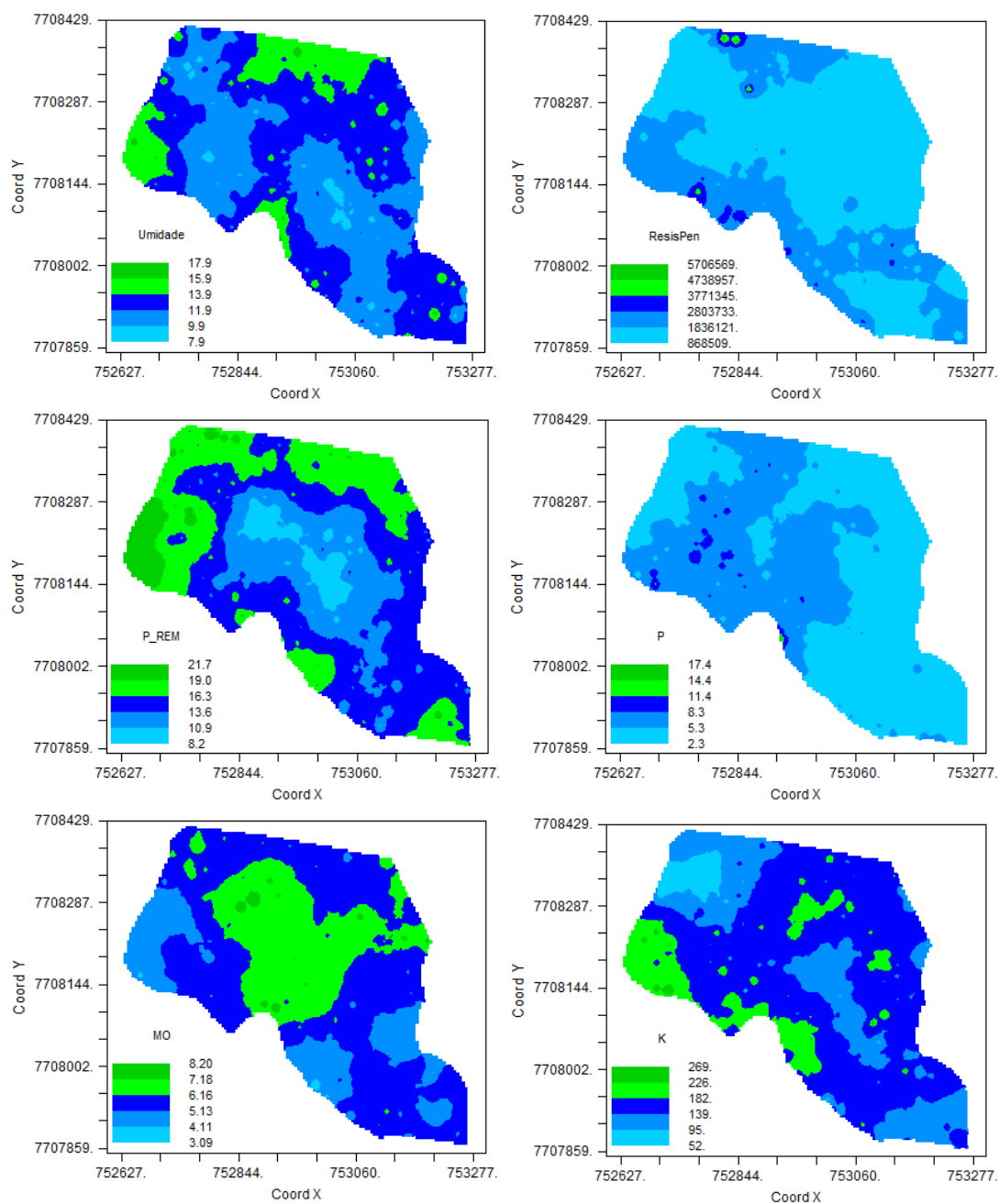


Figura 1A. Mapas da interpolação para os atributos umidade, resistência do solo à penetração, fósforo remanescente, fósforo, matéria orgânica e potássio.

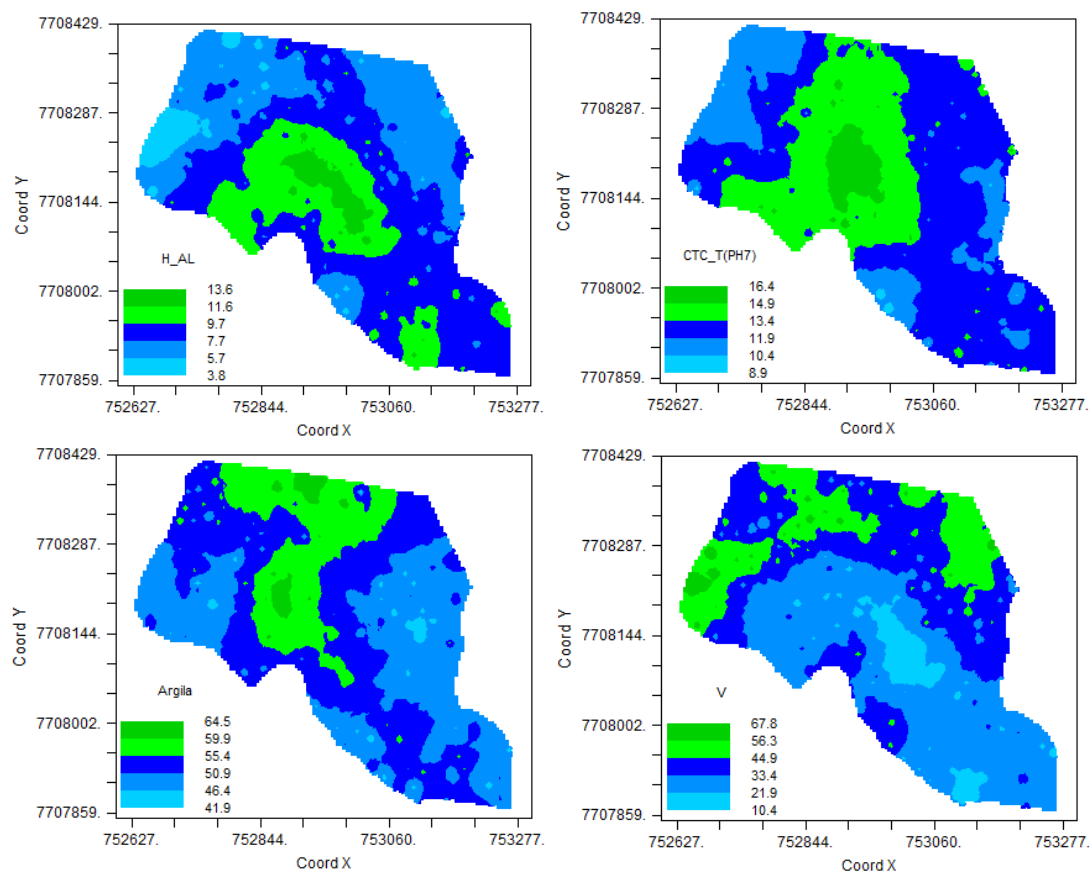


Figura 2A. Mapas da interpolação para os atributos acidez potencial, capacidade de troca de cátions, argila e saturação por bases.

APÊNDICE B

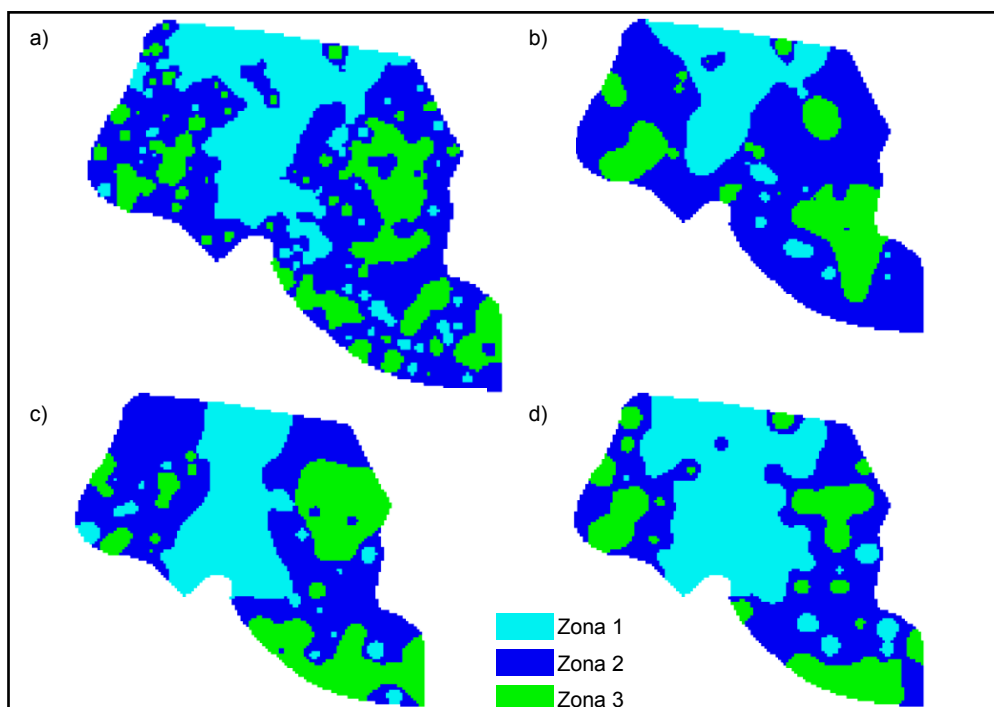


Figura 1B. Zonas de manejo da argila geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras

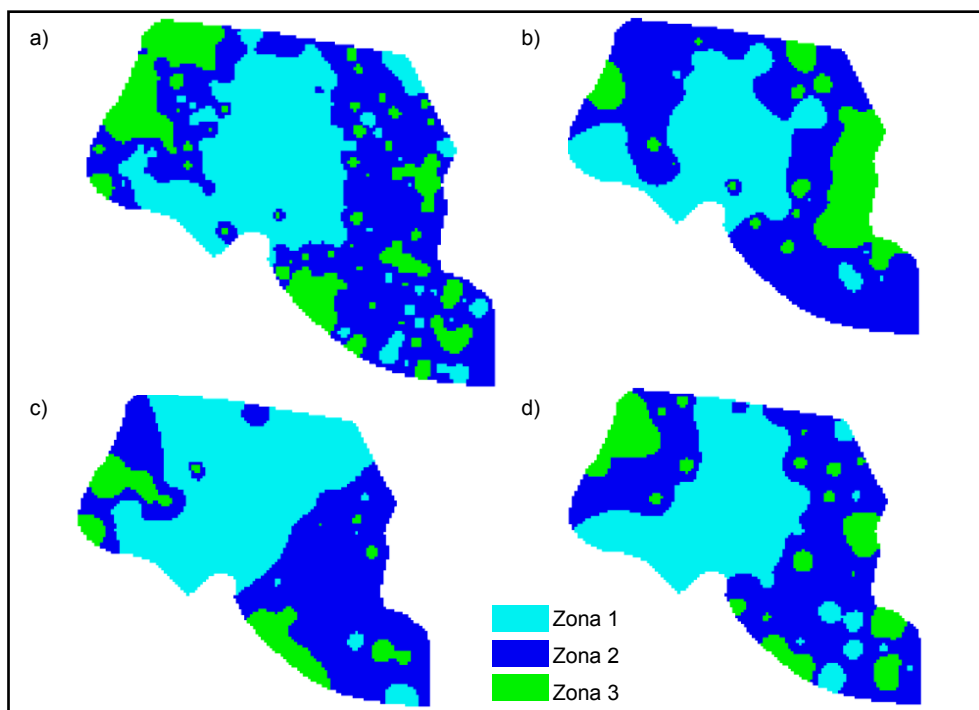


Figura 2B. Zonas de manejo da capacidade de troca de cátions a pH 7 geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

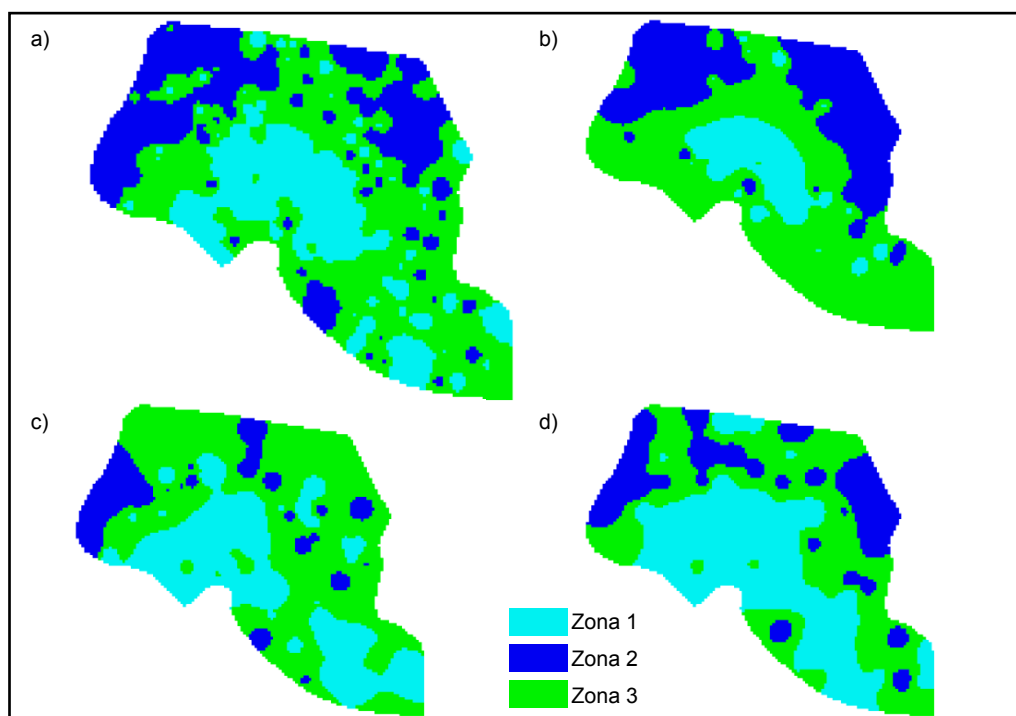


Figura 3B. Zonas de manejo da acidez potencial geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

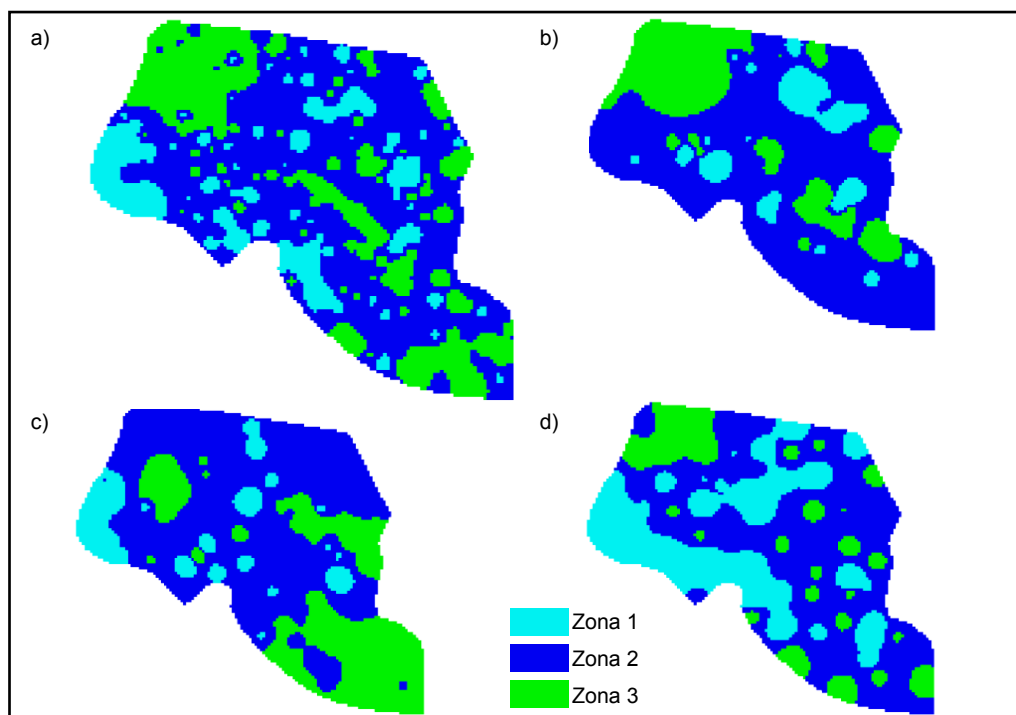


Figura 4B. Zonas de manejo do potássio geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

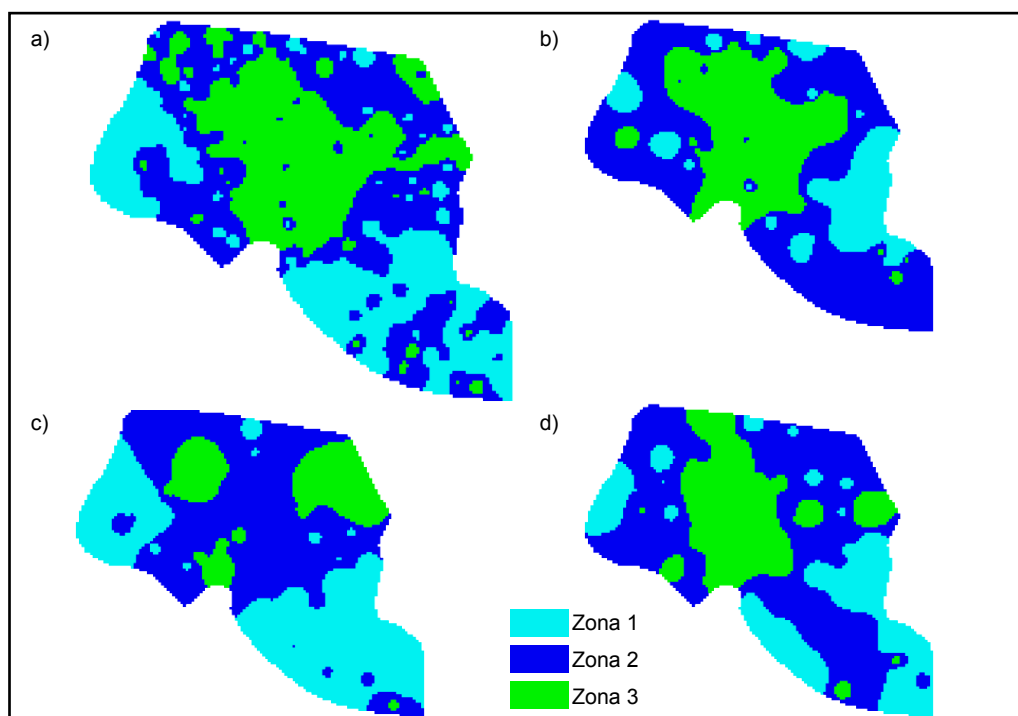


Figura 5B. Zonas de manejo da matéria orgânica geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

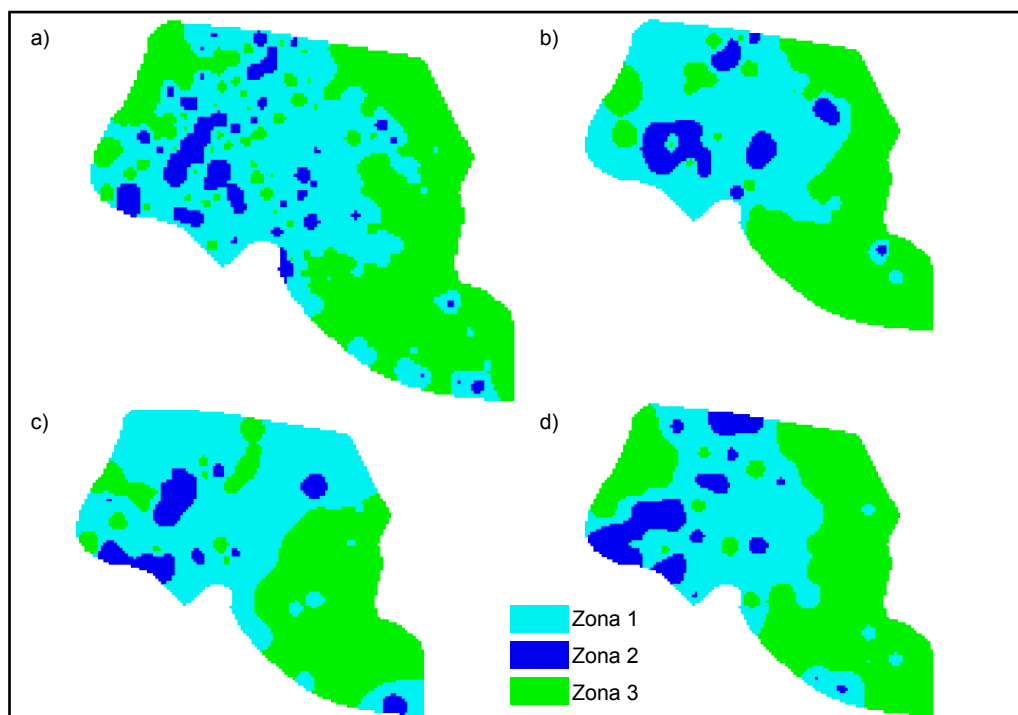


Figura 6B. Zonas de manejo do fósforo geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

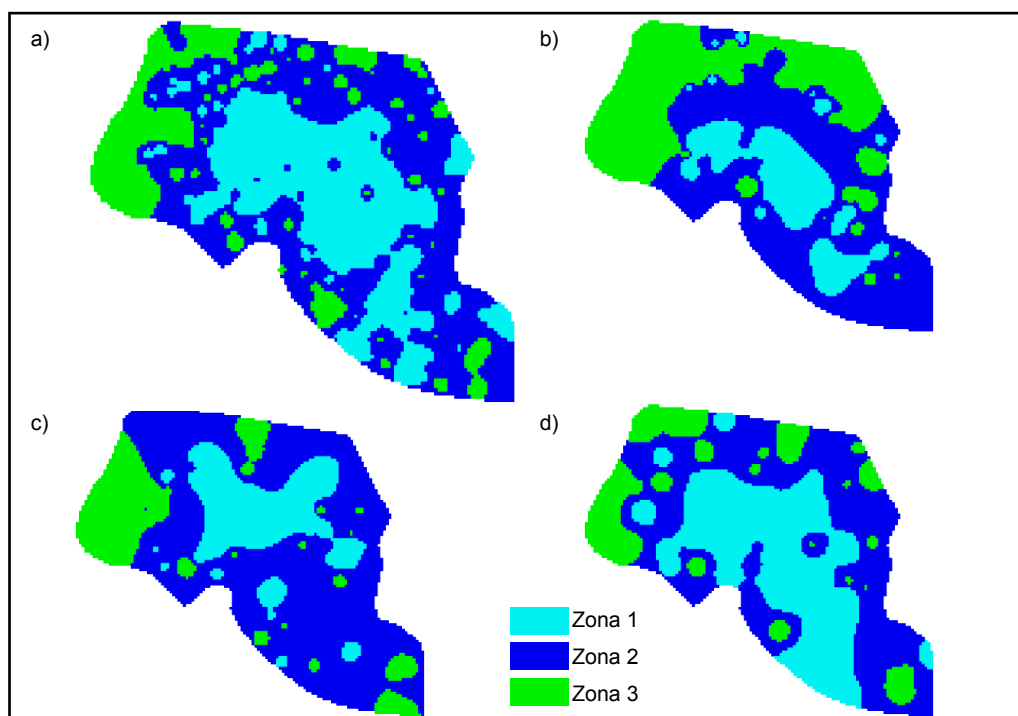


Figura 7B. Zonas de manejo do fósforo remanescente geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

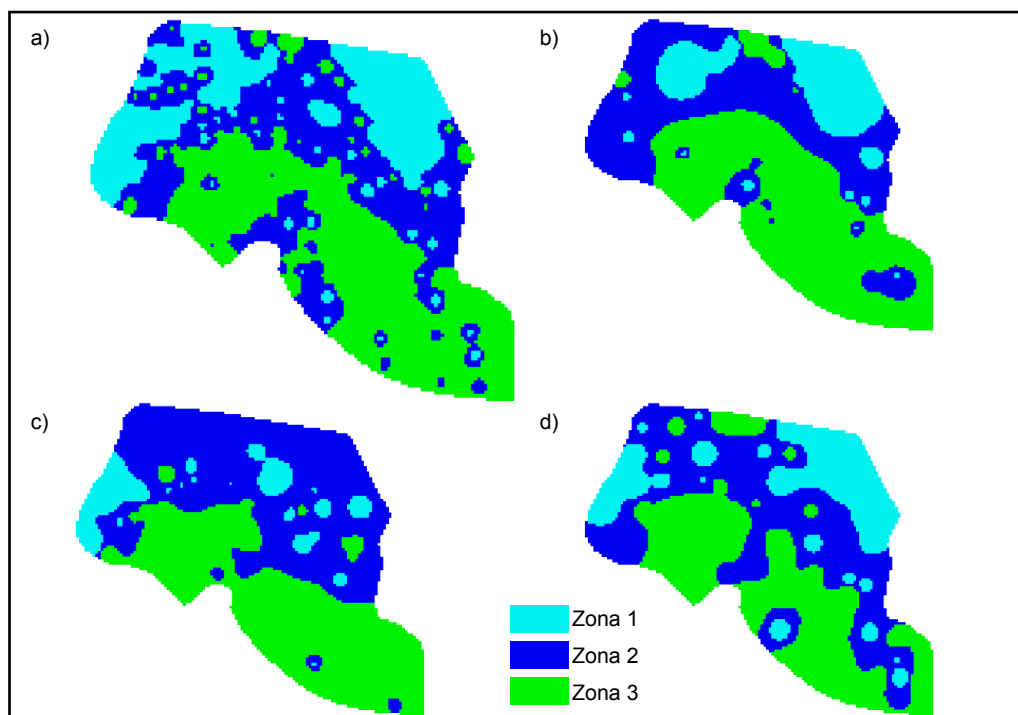


Figura 8B. Zonas de manejo do pH geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

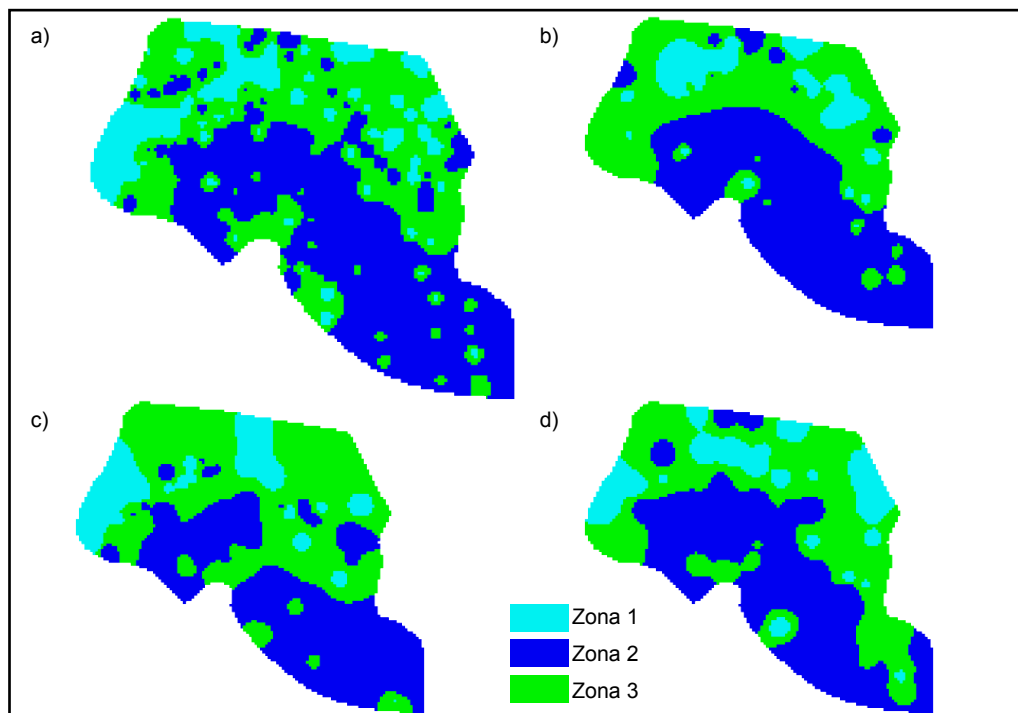


Figura 9B. Zonas de manejo da saturação por bases geradas com base nas informações: a) real, b) da estratégia 1 com 75 amostras, c) da estratégia 2 com 75 amostras e d) da malha com 75 amostras.

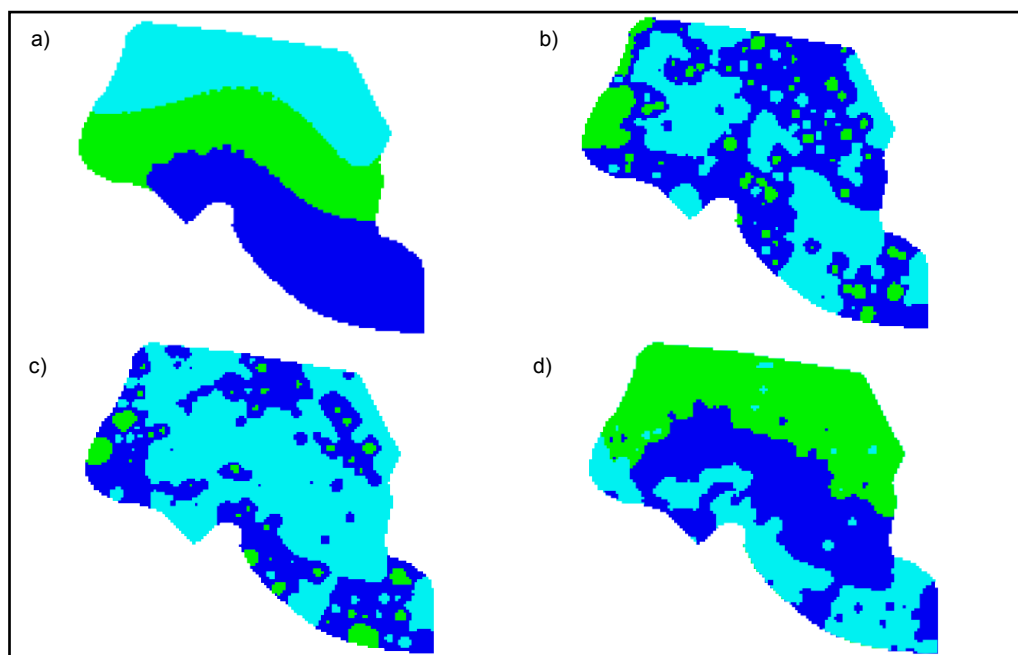


Figura 10B. Zonas de manejo geradas com base: a) altitude; b) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,20 m; c) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m; d) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m e altitude (continua).

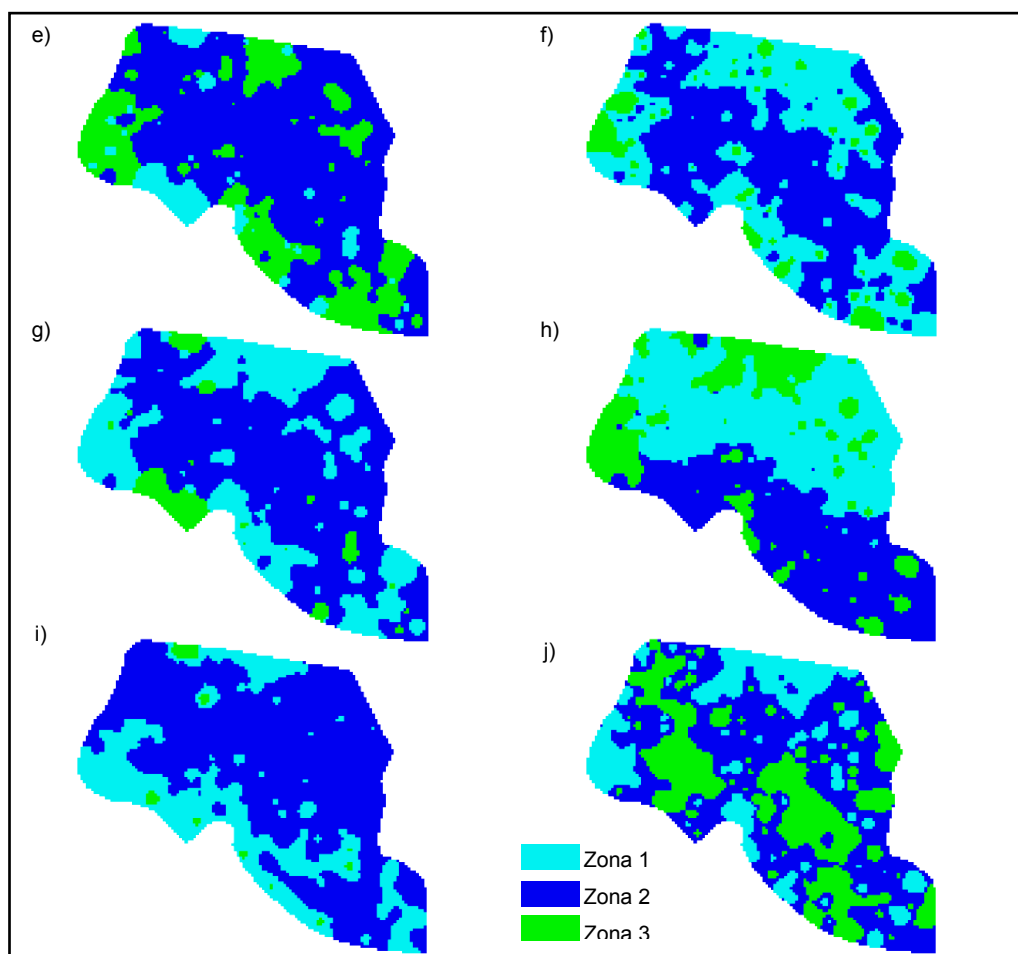


Figura 10B (Continuação). Zonas de manejo geradas com base: e) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m e resistência do solo à penetração; f) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m e umidade no solo; g) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m, umidade no solo e resistência do solo à penetração; h) condutividade aparente do solo na profundidade de 0 a 0,40 m, umidade no solo, resistência do solo à penetração e altitude; i) resistência do solo à penetração e j) umidade.