



UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO

ZONAS DE MANEJO NA CAFEICULTURA DE PRECISÃO

JOÃO LUIZ JACINTHO

2016



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

ZONAS DE MANEJO NA CAFEICULTURA DE PRECISÃO

JOÃO LUIZ JACINTHO

Sob a orientação do professor
Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de concentração em Sistemas Agrícolas.

Seropédica, RJ
Fevereiro, 2016

631.3

J12z

T

Jacinto, João Luiz, 1987-
Zonas de manejo na cafeicultura de
precisão / João Luiz Jacinto. - 2016.
37 f.: il.

Orientador: Gabriel Araújo e Silva Ferraz.
Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e
Ambiental, 2016.

Bibliografia: f. 30-37.

1. Agricultura de precisão - Teses. 2.
Café - Cultivo - Teses. 3. Solos - Manejo -
Teses. I. Ferraz, Gabriel Araújo e Silva,
1985- II. Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental. III.
Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

JOÃO LUIZ JACINTHO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de concentração em Sistemas de Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/02/2016.

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz, UFLA.
(Orientador)

Prof. Dr. Murilo Machado de Barros, UFRRJ.

Prof. Dr. Flávio Castro da Silva, UFF.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Sandra Ferreira da Rosa Jacintho, por ser sempre me incentivar a ir mais longe. Você é e sempre será minha maior inspiração para vencer todos os obstáculos.

A memória de meu pai, José Luiz Jacintho, que sempre será minha referência de homem de caráter e de acadêmico dedicado. Você se foi, mas seu exemplo se mantém vivo nos meus princípios e convicções.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais Sandra e José Luiz (*in memorian*), e aos meus irmãos Ana, Eduardo, Júnior, Maria e Renata, por sempre acreditarem nos meus sonhos e vivenciá-los ao meu lado, e principalmente, pelo amor incondicional.

A meu cunhado José Lucena Barbosa Júnior, por sempre acreditar no meu potencial e se fazer presente me incentivando a ir além da minha zona de conforto.

Agradeço a meus amigos pela ajuda e paciência de sempre e a todos aqueles que fizeram parte da minha jornada acadêmica e da minha vida de forma geral.

Minha gratidão eterna ao professor e orientador Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz, que apesar da distância se fez sempre presente e disposto a me apoiar em diversos momentos.

À banca examinadora, pelas sugestões.

Aos colegas do IFNMG – *Campus Araçuaí*, pela compreensão para a finalização deste trabalho.

Agradeço ainda a todos aqueles que torceram a favor e todos que torceram contra, pois independentemente da forma, me deram mais vontade de ir em frente.

RESUMO

JACINTHO, João Luiz. **Zonas de Manejo na Cafeicultura de Precisão**. 2016. 48p Dissertação (Mestrado em Ciências, Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

A delimitação de zonas de manejo consiste no agrupamento de regiões com características semelhantes, possibilitando a administração mais precisa de insumos. Este trabalho foi elaborado na Fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas – MG, em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica L.*) da cultivar Topázio (MG 1190), transplantada em dezembro de 2005, no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3,289 plantas.ha⁻¹. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso e o clima do local é caracterizado como ameno, tropical de altitude, com temperaturas moderadas, verão quente e chuvoso, classificado por Köppen como Cwa. Demarcou-se na área em estudo, com a utilização de receptores GPS topográficos uma malha amostral regular, com pontos espaçados de 57 x 57 m, totalizando 64 pontos amostrais georreferenciados (em média 2,9 pontos por hectare). O estudo teve como objetivo aplicar técnicas de agricultura de precisão no cafeeiro, utilizando análise de correlação na definição de zonas de manejo. Utilizou-se o método de análise descritiva dos dados seguido da análise de correlação entre os atributos de solo, as características agronômicas das plantas e produtividade. Foram avaliados atributos químicos de solo, características agronômicas das plantas e produtividade do cafeeiro. Os atributos químicos do solo avaliados foram: pH do solo, disponibilidade de Fósforo (P), Fósforo remanescente (Prem), disponibilidade de Potássio (K), Cálcio Trocável (Ca²⁺), Magnésio Trocável (Mg²⁺), Acidez Trocável (Al³⁺), Acidez Potencial (H + Al), Saturação por Alumínio (m), CTC potencial (T), CTC efetiva (t), Soma de Bases (SB), Saturação por Base (V) e Matéria orgânica (MO). As características agronômicas das plantas avaliadas foram: produtividade, índice de maturação, enfolhamento, altura da planta e diâmetro de copa. A altitude também foi analisada. As variáveis que se mostraram candidatas a referências na definição de zonas de manejo foram analisadas através da geoestatística, para verificar sua dependência espacial. Os resultados mostram que foi possível definir os atributos que mais se relacionaram com a produtividade (altitude, diâmetro de copa e fósforo) e confirmando os resultados da análise de correlação, as variáveis altitude, fósforo e diâmetro de copa, quando utilizadas na definição de zonas de manejo influenciaram a média da produtividade. A integração metodológica adotada para definir zonas de manejo mostrou-se adequada para o reconhecimento de padrões de agrupamento nas variáveis que estiveram correlacionadas com a produtividade. Foi possível verificar a correlação dos atributos do solo e das características agronômicas das plantas com a produtividade e definir as zonas de manejo na cultura do cafeeiro, utilizando as variáveis altitude, diâmetro de copa e fósforo (P). A utilização da cafeicultura de precisão se mostrou muito importante no manejo do solo e da planta visando o melhoramento de técnicas e operações de campo que garantam o bom desenvolvimento da cultura.

Palavras-chave: agricultura de precisão, café.

ABSTRACT

JACINTHO, João Luiz. **Management Zones in Precision Coffee farming**. 2016. 48p Dissertation (Master Science in Agriculture and Environmental Engineering). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

The delimitation of management zones consists on grouping regions with similar characteristics, making possible a better administration of inputs. This work was developed in Brejão farm, in Três Pontas, Minas Gerais state, in a 22 hectares coffee (*Coffea arabica L.*) Topázio (MG 1190) farm area, planted at December 2005, with a spacing of 3,8 meters between lines and 0,8 meters between plants, totalizing 3,289 plants per hectare. The area soil was classified as Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso and the local weather is characterized as bland, highly tropical, with moderate temperatures, hot and rained summer, classified by Köppen as Cwa. The study area was sampled on a regular grid, using topographic GPS receivers, with samples far-between 57 per 57 meters, totalizing 64 georeferenced samples (medium of 2,9 points per hectare). This study aims apply precision agriculture techniques in coffee cultivation, using correlation analysis to define management zones. Were evaluated chemistry soil attributes, agronomic plant characteristics and coffee yield. Chemistry soil evaluated were: soil pH, phosphorus availability (P), reminiscent phosphorus (Prem), potassium availability (K), changeable calcium (Ca^{2+}), changeable magnesium (Mg^{2+}), changeable aluminum (Al^{3+}), potential acidity ($\text{H} + \text{Al}$), aluminum saturation (m), potential cation exchange capacity (T), effective cation exchange capacity (t), sum of bases (SB), base saturation (V) and organic matter (OM). Agronomic plant characteristics evaluated were: coffee yield, maturation index, leafiness, plant height and crown diameter. Altitude was analyzed too. Descriptive analysis was applied on data followed by correlation analysis between soil attributes, agronomic plant characteristics and coffee yield. Variables who demonstrate potential to define management zones were analyzed by geostatistics to verify spatial dependence. Results showed that were possible define the attributes more related to coffee yield (level, crown diameter and phosphorus) and confirmed the correlation analysis, these attributes when used to define management zones, showed influence on coffee yield medium. Methodology adopted seems to be suitable on pattern recognition of attributes correlated with coffee yield. Was possible verify correlation between soil and plant attributes with coffee yield and define management zones in coffee cultivation, using the variables: level, phosphorus and crown diameter. Precision coffee cultivation showed the importance in soil and plant management, looking for improves techniques and field operations to guarantee the good development of the plant cultivation.

Keywords: precision agriculture, coffee.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Análise descritiva dos atributos químicos do solo e das características agronômicas da cultura do café (Três Pontas, MG, 2011). 13
- Tabela 2.** Matriz de correlação das variáveis estudadas (Três Pontas, MG, 2011). 14
- Tabela 3.** Ordem de classificação das variáveis candidatas a elaboração das zonas de manejo. 15
- Tabela 4.** Parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais pelo método OLS e modelo esférico. 15
- Tabela 5.** Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável altitude para duas zonas de manejo. 17
- Tabela 6.** Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável altitude para três zonas de manejo. 18
- Tabela 7.** Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável altitude para quatro zonas de manejo. 19
- Tabela 8.** Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável diâmetro de copa para duas, três e quatro zonas de manejo. 20
- Tabela 9.** Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável fósforo para duas, três e quatro zonas de manejo. 21
- Tabela 10.** Análise dos mapas de zonas de manejo delineadas com base na variável altitude. 24
- Tabela 11.** Análise dos mapas de zonas de manejo delineadas com base na variável diâmetro de copa. 26
- Tabela 12.** Análise dos mapas de zonas de manejo delineadas com base na variável fósforo. 28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Malha amostral de lavoura de cafeeiro e comportamento do relevo, Fazenda Brejão, Três Pontas – MG. 10

Figura 2. Semivariogramas das variáveis (a) altitude, (b) diâmetro de copa e (c) fósforo (P). 16

Figura 3. Zonas de manejo segundo a variável altitude: (a) duas zonas, (b) três zonas e (c) quatro zonas. 23

Figura 4. Zonas de manejo segundo a variável diâmetro de copa: (a) duas zonas, (b) três zonas e (c) quatro zonas. 25

Figura 5. Zonas de manejo segundo a variável fósforo: (a) duas zonas, (b) três zonas e (c) quatro zonas. 27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivos específicos	2
3 REFERENCIAL TEÓRICO	2
3.1 Agricultura de precisão	2
3.2 Cafeicultura de precisão	3
3.3 Variabilidade espacial de atributos do solo	4
3.4 Variabilidade espacial da produtividade do cafeeiro	5
3.5 Geoestatística	7
3.6 Zonas de manejo	7
4 MATERIAIS E MÉTODOS	9
4.1 Caracterização da área experimental	9
4.2 Malha amostral	9
4.3 Amostragem de atributos do solo	10
4.4 Amostragem de atributos da planta	10
4.5 Análise geoestatística	11
4.6 Análise de correlação	11
4.7 Definição de zonas de manejo	12
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
5.1 Análise Descritiva	12
5.2 Análise de Correlação	14
5.3 Análise Geoestatística	15
5.4 Definição das Zonas de Manejo	16
5.5 Elaboração de mapas temáticos de zonas de manejo	22
6 CONCLUSÕES	28
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1 INTRODUÇÃO

O café é um dos produtos agrícolas que tem relevante importância comercial a diversos países, se destacando com um dos itens mais exportados. Sua cadeia produtiva emprega milhares de pessoas no mundo e o Brasil se sobressai neste cenário. O plantio do café ocorre em diversos biossistemas e regiões ao redor do mundo e é um dos principais produtos de exportação e se apresenta como a base econômica de vários municípios e regiões do Brasil.

Com intuito de garantir a sustentabilidade e a viabilidade econômica da produção, é importante dominar as técnicas de produção e manejo envolvidas na atividade cafeeira, assim como compreender o efeito por elas causado na produção e no desenvolvimento das plantas. O agronegócio do café brasileiro adotou técnicas de produção que promoveram impactos positivos sobre produtividade, competitividade e qualidade final do produto. Uma destas técnicas, que influencia diretamente esta modernização dos processos é a implantação da agricultura de precisão (AP) nas lavouras cafeeiras.

No Brasil a AP já vem sendo aplicada com sucesso em culturas anuais, como a soja, milho, algodão, entre outras, e a cafeicultura tem modernizado seus processos produtivos com o objetivo constante de aumentar, ou manter, a produtividade e a rentabilidade das lavouras. No agronegócio do café, aos poucos, a agricultura de precisão tem ganhado aceitação e, tecnologias inovadoras têm sido desenvolvidas especificamente para esta cultura.

A AP consiste em um conjunto de tecnologias e componentes que possibilita a tomada de decisões certas, nos locais corretos, no melhor tempo e da melhor forma, utilizando coletas intensivas de informações e dados, e no processamento em tempo e espaço para gerar utilizações mais eficientes em lavouras, melhorando a produção e qualidade ambiental. Fundamenta-se no princípio de que a gestão dos fatores de produção pode ser melhorada e a rentabilidade potencialmente elevada.

A AP auxilia na identificação de estratégias de gerenciamento que podem ser adotadas a fim de aumentar a eficiência na agricultura. Para a sociedade, os benefícios incluem a criação de empregos de alta tecnologia (computadores, maquinários guiados, sensores de solo e de colheita, gestão de informação, sistemas de suporte de decisão), e a mitigação da poluição ambiental ascendente pelo uso racional de fertilizantes.

A AP não consiste apenas em uma ferramenta tecnológica, mas sim em um conjunto de componentes, tecnologias e metodologias, que podem ser utilizados por agricultores que procuram maneiras de formar sistemas que atendam suas necessidades e seu estilo de gestão.

Observa-se que a expertise dos produtores rurais é um dos principais fatores no desenvolvimento da agricultura, visto que estes possuem a habilidade de identificar áreas de cultivo que apresentam maiores e ou menores rendimentos. Contudo, há ainda diversas informações desconhecidas pelo produtor, que devem ser levadas em consideração para que ele possa desenvolver ainda mais a sua cultura. A AP oferece as ferramentas necessárias para o produtor conhecer as necessidades de sua propriedade, utilizando dados amostrados em campo e a análise da variabilidade espacial dos atributos ligados a cultura, formando uma base de dados capaz de auxiliar a tomada de decisões.

Conhecendo a distribuição dos atributos de solo, da planta e a produtividade da região, o produtor pode procurar formas de definir sua área de plantio em sub-regiões que possibilitem um manejo adequado com suas necessidades. A amostragem em grade demanda a coleta de um número elevado de amostras, o que torna o processo trabalhoso e oneroso ao produtor. O delineamento de zonas de manejo é uma maneira de garantir a administração variável de insumos, uma vez que são definidas regiões ou sub-áreas da lavoura, diferenciando-as das restantes com o propósito de aplicar manejos individuais.

Zonas de manejo podem ser consideradas áreas semelhantes em produção potencial, eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental. Cada zona que apresente propriedades similares deve receber níveis apropriados de insumos (sementes, fertilizantes, agroquímicos e água), de acordo com as necessidades da planta e do solo. A definição dessas zonas oferece vantagens econômicas ao produtor, uma vez que poderá gerar uma economia de insumos e um potencial aumento de produção.

O conjunto de técnicas de AP aplicadas ao cultivo de cafeeiros é denominado cafeicultura de precisão. Existem poucas pesquisas na literatura que envolvam a definição de zonas de manejo utilizando técnicas ligadas a cafeicultura de precisão, especialmente pesquisas que utilizem atributos de solo e características agronômicas juntamente com a produtividade do cafeeiro.

Desta forma, pesquisas que subsidiem o desenvolvimento de técnicas que viabilizem a aplicação da agricultura de precisão e identificação de zonas de manejo, são de fundamental importância para a difusão da técnica na cultura do cafeeiro. Este conjunto de técnicas e tecnologias pode possibilitar a aplicação racional, localizada e individualizada dos insumos, baseado em mapas de produtividade e atributos do solo para que sejam definidas zonas de manejo, e garantir resultados ambientais e econômicos.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo aplicar técnicas de agricultura de precisão (AP) no cultivo do café, utilizando análise de correlação na definição de zonas de manejo. Objetiva-se, também, contribuir para a difusão das técnicas de AP na cultura do cafeeiro, bem como corroborar para a expansão do uso de zonas de manejo na cafeicultura.

2.1 Objetivos específicos

- Verificar a correlação dos atributos do solo e características agronômicas da planta com a produtividade, selecionando as variáveis mais propícias a geração de zonas de manejo na cultura do cafeeiro;
- avaliar a dependência espacial dos atributos escolhidos como candidatos a geração de zonas de manejo;
- definir zonas de manejo, e
- contribuir para a difusão das técnicas e tecnologias de agricultura de precisão junto à comunidade científica e aos cafeicultores.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Agricultura de precisão

Como estabelecido por SCHUELLER (1992), agricultura de precisão (AP) é um conjunto de tecnologias aplicadas que permitem a um sistema de manejo baseado na variabilidade espacial do solo e das propriedades da cultura, aplicável em qualquer área com objetivo de aperfeiçoar a rentabilidade e a sustentabilidade e proteção ambiental.

Segundo SILVA et al. (2008), os métodos e equipamentos para adoção de AP já são bem conhecidos para as culturas de cereais, e inclusive já vindo sendo comercializados no país. A realidade já é um pouco diferente para culturas especiais como laranja, cana-de-açúcar e café, onde inexitem ou existem poucos trabalhos publicados sobre a utilização dos conceitos de AP (BALASTREIRE et al., 2001).

A AP baseia-se no princípio de que a gestão dos fatores de produção pode ser melhorada e a rentabilidade potencialmente elevada. Isso pode ser possível, utilizando-se

informações de variabilidade espacial e de tecnologias de aplicação de insumos a taxas variáveis (DERCON et al., 2006; HURLEY et al., 2005; MZUKU et al., 2005). Segundo FERRAZ et al. (2012a), o emprego das técnicas de AP na produção de café pode ser definido como cafeicultura de precisão.

Além do benefício do aumento de produtividade e da lucratividade, a AP apresenta outros benefícios percebidos, que incluem maior precisão na aplicação de fertilizantes para o melhor rendimento de colheita, assim como menores custos com elementos químicos e combustíveis (MULLA, 1997).

A AP possibilita o monitoramento da cadeia de produção de alimentos e o manejo da qualidade e da quantidade da produção agrícola, e ainda permite um melhor uso de recursos, mantendo a qualidade do ambiente e potencializando a produtividade (GEBBERS & ADAMCHUK, 2010).

3.2 Cafeicultura de precisão

O café, segundo FERRAZ et al. (2012b), é uma das culturas mais importantes para a economia brasileira e o conhecimento profundo de todas as etapas de manejo dessa cultura, desde o plantio até a colheita, é de suma relevância para o sucesso de sua produção. De acordo com MOLIN et al. (2010), por um longo período da história do Brasil, o café tem sido um dos produtos comerciais mais importantes, especialmente durante a colonização europeia no século XIX, e hoje a cultura do cafeeiro ainda cumpre um importante papel econômico e social.

O termo “Cafeicultura de Precisão” pode ser entendido como o emprego das técnicas de agricultura de precisão na produção de café (ALVES et al., 2006). As características do solo da cultura variam no espaço (distância e profundidade) e no tempo. Assim, a cafeicultura de precisão pode ser definida como um conjunto de técnicas que visa à otimização do uso dos insumos agrícolas (fertilizantes, corretivos, sementes e defensivos) em função da variabilidade espacial e temporal de fatores associados ao sistema água-solo-planta.

A cafeicultura de precisão pode, ainda, ser definida como o conjunto de técnicas e tecnologias capaz de auxiliar o cafeicultor a manejar sua lavoura, baseando-se na variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, visando maximizar a rentabilidade, aumentar eficiência da adubação, pulverização e colheita, culminando na elevação da produtividade e da qualidade final do produto (FERRAZ et al., 2012b).

A produtividade da cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sofre oscilações devido a ocorrência de infestações fitossanitárias (CHALFOUN et al., 1978), características fisiológicas da cultura (RENA et al., 1996), sistema de plantio adotado, densidade e população de planta (TOLEDO & BARROS, 1999), declividade e posição topográfica (SOUZA et al., 2004), fatores climáticos (CARVALHO et al., 2004) e outros fatores ainda não bem elucidados (CARVALHO et al., 2006).

Segundo MOLIN et al. (2010), o café é um dos poucos produtos agrícolas que o preço é baseado em parâmetros qualitativos e seu valor sofre variações significativas conforme sua qualidade aumenta. A globalização da economia e a competitividade econômica dos produtos agrícolas, gerou a necessidade de se alcançar níveis internacionais de qualidade da produção (SILVA et al., 2008). Considerando a necessidade por melhoras qualitativas e quantitativas na produção cafeeira, novos métodos para aumentar a eficiência deste sistema de produção devem ser elaborados e novas técnicas de manejo devem ser utilizadas (LIMA et al., 2013).

3.3 Variabilidade espacial de atributos do solo

Normalmente, em grandes áreas de produção utiliza-se uma gestão convencional, na qual ocorrem aplicações uniformes de fertilizantes, irrigação, sementes, entre outros; enquanto na AP, essas áreas podem ser divididas em zonas de gestão onde cada uma recebe administração customizada, baseada na variação do tipo de solos, declividade, histórico de manejo, dentre outros (LARSON & ROBERT, 1991; MULLA et al., 1996; MULLA, 1993; MULLA et al., 2002; TIAN, 2002; ZHANG et al., 2002).

Para que seja possível refinar as práticas de manejo e avaliar os efeitos da agricultura, é importante conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo. A identificação dessa variabilidade é, em um sistema de produção que visa à sustentabilidade por meio do manejo localizado, um fator de considerável relevância (CAMBARDELLA et al., 1994; CORÁ et al., 2004).

Algumas metodologias de coleta de amostra de solo foram pesquisadas, a fim de se conseguir mapear os atributos do solo. MARQUES JUNIOR et al. (2000) instalaram uma parcela de 200 por 850 metros em duas subáreas plantadas com cafeeiros, dividindo-as numa malha com espaçamento regular de 50 metros entre pontos, totalizando 68 pontos para cada malha. Os solos foram amostrados em duas profundidades (0-20 cm e 60-80 cm).

MOLIN et al. (2002), pesquisando duas lavouras cafeeiras, de áreas 8,2 ha (campo 1) e 5,3 ha (campo 2). Foi utilizado um amostrador automatizado nas grades regulares implementadas em cada área. No campo 1 foram retiradas 32 amostras (aproximadamente 3,9 amostras/ha), e no campo 2 foram retiradas 38 amostras (7,2 amostras/ha), sendo cada amostra composta de 9 subamostras.

MOLIN et al. (2006), realizando uma amostragem de solo em uma lavoura cafeeira visando à recomendação de adubação em taxa variável, coletou 16 pontos de amostragem em malha ajustada pelas linhas da cultura. Em cada ponto foram coletadas 10 subamostras de material de solo, com a utilização de um trado de rosca, para compor uma amostra composta representativa do ponto de amostragem, na profundidade de 0-20 cm.

Uma característica comum aos trabalhos de MARQUES JUNIOR et al. (2000), MOLIN et al. (2002, 2006), e SILVA et al. (2007, 2008) é que os atributos de solo estudados apresentaram grau de dependência espacial forte e que, com os mapas de isovalores, foi possível definir zonas de altas e baixas fertilidades, que sugerem manejo regionalizado.

OLIVEIRA et al. (2010) avaliaram a variabilidade espacial do estado nutricional do cafeeiro visando o manejo localizado da adubação via foliar e no solo. Foram amostrados 60 pontos georreferenciados em intervalos irregulares, em uma área de um hectare e cada ponto amostral foi constituído de cinco plantas, sendo retirados dois pares de folhas dos ramos laterais nos pontos cardeais de cada planta, totalizando 80 folhas por ponto. As amostras foliares foram analisadas, quimicamente, para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Zn. Os nutrientes N e P apresentaram distribuição aleatória e os demais nutrientes apresentaram moderada a forte dependência espacial, o que segundo os autores justifica a análise dos dados pela geoestatística na confecção de mapas de aplicação diferenciada e localizada de fertilizantes via foliar e solo na lavoura cafeeira.

FERRAZ et al. (2011) compararam a viabilidade econômica de dois sistemas de adubação na lavoura cafeeira, utilizando técnicas da agricultura de precisão e o sistema de aplicação convencional. Os dados utilizados foram obtidos dos custos de produção de três áreas (22 ha, 10,52 ha e 6,23 ha) de uma fazenda no município de Três Pontas - MG, onde foram realizadas aplicações de fertilizantes de forma diferenciada nas safras de 2007/2008 e 2008/2009. Este estudo observou que a adubação diferenciada foi vantajosa para as áreas de

22 ha e 10,52 ha, nas duas safras estudadas, e para a área de 6,23 ha apenas foi vantajosa (menor prejuízo) na safra de 2008/09.

FERRAZ et al. (2012b), avaliaram a disponibilidade de fósforo, potássio e a produtividade de uma área de 22 hectares de cafeeiro, através de análises dos semivariogramas e mapas de isolinhas, obtidos por meio de krigagem. Foram utilizadas amostras georreferenciadas com auxílio de um quadriciclo com trado calador e dados de produtividade, obtidos de forma manual. Os autores observaram que a metodologia adotada permitiu a caracterização da magnitude da variabilidade espacial do fósforo, potássio e da produtividade da lavoura cafeeira, o que permitiu a análise da relação entre essas variáveis. FERRAZ et al. (2012a) utilizaram a geoestatística na avaliação das variáveis fósforo, potássio e produtividade do cafeeiro em três safras (2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010), para mesma área de estudo e puderam observar que estas variáveis sofreram grandes variações no tempo e no espaço.

CARVALHO et al. (2013) avaliaram por meio da estatística clássica, geoestatística e de princípios de agricultura de precisão, atributos físicos do solo indicativos de compactação, como a densidade do solo, resistência mecânica à penetração e teor de argila, além de algumas características agrônomicas da planta de café, como a altura e a produtividade. Os autores observaram que as variáveis apresentaram dependência espacial moderada ou forte e que a produtividade e a altura das plantas foram maiores em regiões em que havia menores valores de resistência do solo à penetração, para todas as camadas de solo avaliadas.

ZONTA et al. (2014) avaliaram a variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo em Latossolo Vermelho Amarelo em plantio direto para o algodoeiro no estado de Goiás, visando à adoção da agricultura de precisão no manejo da área de 57,6 ha estudada. Inicialmente foram determinados os teores de P, K, Ca, Mg, S, Na, Cu, Mn, B, Zn, Fe, matéria orgânica (MO), pH, soma de bases (SB), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e condutividade elétrica aparente do solo (CE) a 30 e 90 cm de profundidade, efetuou-se a análise descritiva clássica e a modelagem de semivariogramas para todos os atributos e mapas de krigagens. A dependência espacial das propriedades do solo analisadas indicou que as variações espaciais devem ser consideradas no planejamento de coleta de amostras de solo, assim como nas práticas de manejo do solo.

3.4 Variabilidade espacial da produtividade do cafeeiro

O mapeamento da produtividade de uma determinada cultura é uma das fases pertencentes ao ciclo da agricultura de precisão. Esta fase é de extrema importância, pois é na colheita que os produtores irão obter os resultados de seus esforços. Para a cultura de cereais, os métodos e equipamentos necessários já são bastante difundidos e bem fundamentados. Para a cultura do café, ainda há poucos trabalhos na literatura, e ainda não existe tecnologia específica para esta cultura disponível no mercado, o que dificulta a coleta dos dados de produtividade em tempo real.

Segundo MOLIN (2001), o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras, e pode ser utilizado como ponto de partida, a fim de avaliar as causas de variabilidade da produtividade das culturas, bem como verificar as possíveis causas de modificações que o sistema de manejo, em locais específicos, pode trazer (QUEIROZ et al., 2000).

SILVA et al. (2007, 2008) realizaram a colheita manual dos frutos de cafeeiros sobre panos de 4 plantas em torno de pontos amostrais, devidamente georreferenciados, por meio do uso de receptores GPS. O volume colhido de cada planta, após a abanção, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após esta medição, média de produção das plantas foi

calculada, resultando no valor de produção para cada ponto amostral. A área experimental de 6,2 ha, foi dividida em 2 malhas irregulares na distancia de 25 X 25 e 50 X 50 metros, totalizando 67 pontos de amostragem. Os autores concluíram que existiu variabilidade espacial da produtividade, e que a dependência espacial desta variável foi considerada forte.

OLIVEIRA (2007), estudando a produtividade de um plantio do café Robusta, demarcou pontos de amostragens, definidos como células, situados dentro de uma grade irregular de aproximadamente 1 ha, totalizando 109 pontos. As coordenadas de cada ponto amostral foram adquiridas com um GPS geodésico. A coleta foi realizada em cada ponto central da célula num espaçamento de dez em dez metros, na linha do cafeeiro. Os frutos de café das cinco plantas de cada célula foram derriçados manualmente em peneiras e posteriormente colocados em um saco devidamente identificado. No Laboratório foi determinada a produção de café úmido de cada saco (composto de cinco plantas). O autor concluiu que a análise geoestatística, combinada às técnicas de geoprocessamento, possibilitou mapear a variabilidade espacial e identificar a dependência espacial da produtividade do cafeeiro. Esta combinação mostrou-se ainda uma ferramenta extremamente útil no auxílio a programas de agricultura de precisão para a cafeicultura capixaba, visando, sobretudo, à sustentabilidade da atividade.

MOLIN et al. (2010) desenvolveram um procedimento para avaliar a resposta da produtividade de café, a partir da aplicação de fósforo e potássio. Em um experimento realizado no estado de São Paulo foram aplicados dois tratamentos em linhas alternadas de plantas com doses fixas e variadas, um seguindo procedimentos e recomendações locais e o outro com base na amostragem de solo em grade. Na aplicação dos fertilizantes utilizou-se um protótipo de uma adubadora com duas esteiras independentes, uma para cada linha de plantas e na colheita uma colhedora comercial equipada com monitor de produtividade volumétrico. Utilizou-se geoestatística, correlações e regressões na análise de dados e a metodologia mostrou-se efetiva e de fácil execução. A área que recebeu fertilizantes aplicados em doses variadas apresentou produtividade 34% maior se comparada com a área que recebeu adubação em taxa fixa e a aplicação em taxa variada alcançou uma economia de 23% de fósforo e aumento de 13% no consumo de potássio quando comparada com a aplicação dos fertilizantes em taxa fixa, sendo possível observar ainda, efeitos residuais deste tratamento na produtividade do ciclo seguinte.

FERRAZ et al. (2012c) utilizaram análise geoestatística para avaliar a variabilidade espacial na produtividade e na força de desprendimento dos grãos do cafeeiro, por meio de análises dos semivariogramas e de mapas de isolinhas. Os dados foram estimados por meio da Máxima Verossimilhança Restrita (REML – restricted maximum likelihood) e o modelo esférico foi o que melhor se ajustou a variável produtividade, possibilitando aos autores verificar a estrutura e a magnitude de sua variabilidade espacial e produzir mapas de isolinhas. De acordo com os autores, os mapas de isolinhas gerados para a variável produtividade oferecem ao produtor uma ferramenta capaz de auxiliá-lo na aplicação de insumos a taxas variadas e no manejo da colheita, seja ela manual ou mecanizada.

FERRAZ et al. (2012a) utilizaram ferramentas de agricultura de precisão aliadas a ferramentas da geoestatística para avaliar as variáveis produtividade, fósforo e potássio do cafeeiro, em três safras agrícolas, por meio de análises dos semivariogramas e de mapas de isolinhas interpolados por krigagem. Os dados georreferenciados foram adquiridos utilizando os atributos químicos do solo, fósforo e potássio, amostrados com o auxílio de um quadriciclo equipado com trado calador e dados de produtividade, obtidos por meio de colheita manual. A metodologia utilizada permitiu a caracterização da magnitude da variabilidade espacial dos atributos em estudo, que apresentaram grande variação no tempo e no espaço.

LIMA et al. (2014) avaliaram a variabilidade espacial e temporal da produtividade do cafeeiro *canephora* (conilon) em três safras consecutivas, utilizando técnicas de geoprocessamento sobre uma malha amostral constituída por 109 pontos georreferenciados, considerando cinco plantas por ponto. As produtividades apresentaram diferenças significativas, com menor produtividade na safra 3, em 93,5% da área. O índice de produtividade ficou da safra 2 para a 1 em -18,0% e da safra 3 para a 2 em -57,0%, mostrando redução crescente entre as diferentes safras.

3.5 Geoestatística

Por meio da geoestatística, que difere da estatística clássica por considerar a dependência espacial dos dados amostrados, é possível identificar se há ou não dependência espacial para os fatores analisados. Assim, se torna possível analisar os fatores envolvidos nos sistemas produtivos na AP e posteriormente criar mapas temáticos que auxiliam na tomada de decisões na lavoura (CARVALHO et al., 2013).

As primeiras ideias da geoestatística surgiram em 1951, quando Daniel Krige trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguiria encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em consideração a distância entre as amostras (VIEIRA, 2000). Orientador de Krige, George Matheron, é considerado o pai da geoestatística por seus trabalhos nas bases teóricas de um método de interpolação espacial denominado krigagem, na década de 1960 (VALENCIA et al., 2004).

Segundo VIEIRA (2000), George Matheron, baseando-se nas observações de Krige, desenvolveu uma teoria, a qual ele chamou de teoria das variáveis regionalizadas que contém os fundamentos da geoestatística. De acordo com essa teoria, a diferença nos valores de uma dada variável em dois pontos no espaço depende da distância entre eles de acordo com sua dependência espacial. Dessa forma, quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso por meio da dependência espacial, pode-se aplicar a geoestatística para obter informações adicionais às obtidas com a análise clássica.

A geoestatística se apresenta como uma ferramenta com o potencial necessário para reduzir perdas causadas por manejo inapropriado que ocasione baixa produtividade (FLOWERS et al., 2005). Na agricultura, a aplicação da análise geoestatística tem sido útil na caracterização e mapeamento da variação espacial de atributos de culturas (MANZIONE et al., 2002). Para a cultura do café, o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos da planta, é de suma importância para a determinação de estratégias para atender as necessidades da cultura e consequentemente alcançar maior produtividade (SILVA et al., 2010).

3.6 Zonas de manejo

Um dos obstáculos na aplicação de técnicas de AP para aumentar a produtividade e qualidade ambiental é a definição de zonas de manejo – áreas de plantio onde insumos são dosados garantindo retorno econômico ou redução de impactos ambientais (JAYNES et al., 2005). Zonas de manejo são definidas como sub-regiões de uma área que possuem uma homogeneidade relativa e uma combinação de fatores limitantes de produção, onde o atendimento das necessidades de uma cultura específica é apropriado para atingir a eficiência máxima dos insumos agrícolas (DOERGE, 1999; VRINDTS et al., 2005).

Segundo LI et al. (2008), apesar de representar áreas de produtividade semelhante, zonas de manejo têm outras aplicações. Diversos estudos já indicaram que zonas de manejo homogêneas podem ser utilizadas como uma alternativa na malha de amostragem de solo e no

desenvolvimento de mapas de nutrientes para aplicações a taxas variáveis (FLEMING et al., 2000; KHOSLA & ALLEY, 1999).

Diversos métodos já foram aplicados na definição de potenciais zonas de manejo, contudo eles se resumem basicamente a três tipos que baseiam em: análises de solo (FRAISSE et al., 2001; NOLAN et al., 2000; SCHEPERS et al., 2005), propriedades do solo como declividade ou condutividade elétrica (CARR et al., 1991; JOHNSON et al., 2003) e produtividade (BLACKMORE, 2000; DIKER et al., 2004; JAYNES et al., 2003).

A definição de zonas de manejo de acordo com a produtividade não leva em consideração a interação entre solo e planta ou propriedades do relevo, contudo utiliza informações de produtividade na identificação de áreas que a cultura se comporta similarmente ao longo dos anos (LARK, 2001; PARK et al., 1997; STAFFORD et al., 1999). Essa abordagem assume que se os padrões da cultura são similares ao longo do tempo, então as áreas devem responder similarmente a variabilidade climática e ao manejo de insumos, funcionando como zonas de manejo efetivas (JAYNES et al., 2005).

BLACKMORE (2000) utilizou uma série de seis anos de produtividade em uma área de sete hectares cultivados com trigo (*Triticum aestivum*) e couve-nabiça (*Brassica napus*) para classificar zonas de manejo com diferenças de produção e estabilidade de produção. Outros pesquisadores delinearão zonas em diferentes potenciais de produção pelas funções do solo e características topográficas causadas pela erosão (REYNIERS et al., 2006).

Procedimentos de análises de agrupamento têm sido efetivos na divisão de lavouras em subáreas que podem ser uniformemente manejadas (MORARI et al., 2009). Indivíduos similares são agrupados em classes distintas ou grupos baseados em propriedades mensuradas para cada indivíduo (VRINDTS et al., 2003).

Segundo DIACONO et al. (2013), para garantir a contiguidade espacial da variação espacial contínua da planta e do solo, é necessário se aplicar um algoritmo de agrupamento que aplique restrição espacial. Técnicas mais tradicionais de agrupamento buscam obter resultados na estrutura inerente dos dados e produzem grupos naturais no espaço de atributos, sem qualquer referência de posição geográfica, não leva em consideração qualquer correlação espacial entre as observações (DIACONO et al., 2013). Métodos baseados em estimativas de funções de probabilidades não paramétricas provaram serem aqueles com menor tendenciosidade (CASTRIGNANÒ et al., 2006), apresentando a vantagem de detectar grupos de dimensões distintas e variâncias com formatos irregulares, sempre que houver amostras suficientes (DIACONO et al., 2013).

RODRIGUES JUNIOR et al. (2011) definiram zonas de manejo para cafeicultura por meio dos métodos *K-Means* e *Fuzzy C-Means*, com base em determinações realizadas com sensor de clorofila e por análise foliar em uma área de 2,1 ha de cafeeiro, e avaliaram as zonas de manejo obtidas utilizando estes dois métodos de agrupamento. Os métodos de agrupamento de dados *K-Means* e *Fuzzy C-Means* não apresentaram diferenças na geração das zonas de manejo, havendo baixa similaridade entre as zonas de manejo geradas com uso do sensor de clorofila e concentrações foliares.

BAZZI et al. (2013) utilizaram propriedades físicas e químicas do solo e de produtividade, na geração de unidades de manejo. Foram geradas unidades de manejo pelo algoritmo *Fuzzy C-Means*, e sua avaliação foi realizada por meio da redução da variância e realização de testes de comparação de médias. Os autores avaliaram que a metodologia utilizada permitiu a geração de unidades de manejo que podem servir como fonte de recomendação e análise do solo, contudo a ANOVA não apresentou diferenças significativas entre as unidades de manejo.

OLIVEIRA FILHO et al. (2015) aplicaram três critérios para delinear zonas de manejo da compactação do solo: camada onde se iniciam valores de resistência à penetração críticos para o crescimento da cana-de-açúcar; índice de cone da camada de 0-40 cm e profundidade na qual ocorre a máxima resistência à penetração. A amostragem foi realizada em malha com 113 pontos georreferenciados espaçados 100 m, determinando-se a resistência do solo à penetração em oito camadas de 5 cm de profundidade, o índice de cone e a profundidade da máxima resistência por meio de penetrômetro com sistema automático de medição. A krigagem foi utilizada na estimativa de valores para locais não amostrados e permitiu a confecção de mapas de isovalores e definição de quatro regiões no campo para realizar a subsolagem, de forma localizada e que segundo os autores garante o manejo localizado da descompactação do solo, na profundidade mais adequada e em locais onde seja realmente necessário.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de definir zonas de manejo em lavoura de cafeeiro, utilizou-se uma malha amostral com dados georreferenciados que foram analisados através da estatística descritiva, da geoestatística e a correlação entre os atributos de planta e de solo com a produtividade da lavoura do cafeeiro.

4.1 Caracterização da área experimental

O experimento de campo foi desenvolvido na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, sul de Minas Gerais, em uma área de 22 hectares de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica L.*) da cultivar Topázio (MG 1190), transplantada em dezembro de 2005, no espaçamento de 3,8m entre linhas e 0,8m entre plantas, totalizando 3.289 plantas.ha⁻¹. As coordenadas geográficas do ponto central da área são de 21°25'58" de latitude sul e 45°24'51" de longitude oeste de Greenwich. A altitude máxima desta área é de 914,7 m. Os pontos limites da área foram obtidos por meio do uso de GPS topográfico Topcon FC 100.

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Argiloso e o clima do local é caracterizado como ameno, tropical de altitude, com temperaturas moderadas, verão quente e chuvoso, classificado por Köppen como Cwa.

Baseado em Agricultura de Precisão, o manejo imposto na área nas safras 2007/2008 e 2008/2009 foi o de adubação diferenciada, conforme descrito por FERRAZ et al. (2011). Nas demais safras, a adubação foi realizada de forma convencional.

4.2 Malha amostral

Demarcou-se na área em estudo, com a utilização de um par de receptores GPS topográficos modelo Topcon FC 100 (com erro médio de 10 cm), uma malha amostral regular, com pontos espaçados de 57 x 57 m, totalizando 64 pontos amostrais georreferenciados (em média 2,9 pontos por hectare) (Figura 1). A aquisição das coordenadas dos pontos amostrais utilizou o posicionamento relativo estático, onde um receptor é estacionado em um ponto de coordenadas conhecidas e outro é utilizado na aquisição dos novos pontos. Esse modelo de posicionamento permite ao usuário corrigir os erros de posicionamento, através das diferenças na obtenção de coordenadas do ponto que já é conhecido e aplicar a correção nos pontos amostrados.

Cada ponto amostral correspondeu a quatro plantas: duas plantas localizadas na rua de cafeeiros onde o ponto foi georreferenciado e as outras duas plantas localizadas em cada rua

lateral ao ponto de referência (Figura 1a). O comportamento do relevo da área de estudo é apresentado na Figura 1b.

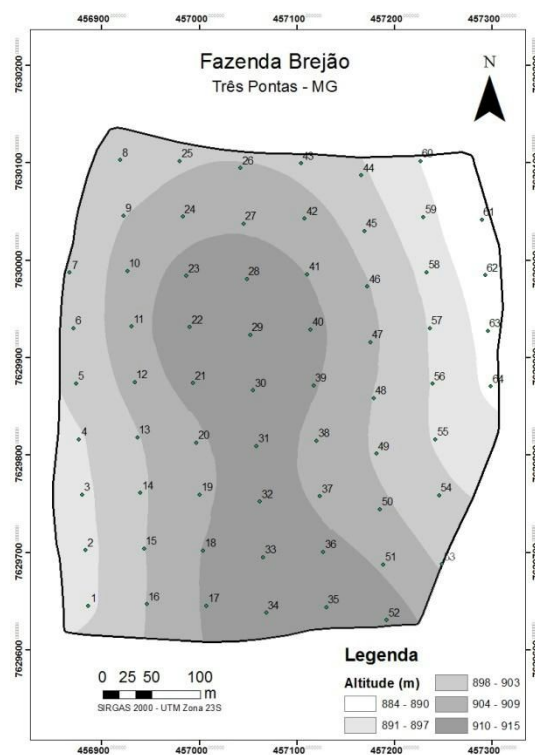


Figura 1. Malha amostral de lavoura de cafeeiro e comportamento do relevo, Fazenda Brejão, Três Pontas – MG.

4.3 Amostragem de atributos do solo

As coletas de amostras do solo foram realizadas em junho de 2011, retirando subamostras na projeção da saia do cafeeiro de 0 a 20 cm de profundidade, com o uso de um trado holandês, em cada planta componente do ponto amostral. Estas subamostras foram homogeneizadas para formar uma amostra composta representativa do ponto em questão e enviadas para o laboratório de Análise de Solo do Departamento de Ciências dos Solos da Universidade Federal de Lavras. Os atributos químicos do solo avaliados foram: pH do solo, disponibilidade de Fósforo (P) (Extrator Mehlich 1), Fósforo remanescente (Prem), disponibilidade de Potássio (K) (Extrator Mehlich 1), Cálcio Trocável (Ca^{2+}) (Extrator: KCL – 1 mol/L), Magnésio Trocável (Mg^{2+}) (Extrator: KCL – 1 mol/L), Acidez Trocável (Al^{3+}) (Extrator: KCL – 1 mol/L), Acidez Potencial (H + Al) (Extrator SMP), Saturação por Alumínio (m), CTC potencial (T), CTC efetiva (t), Soma de Bases (SB), Saturação por Base (V) e Matéria orgânica (MO).

4.4 Amostragem de características agronômicas da planta

Foram coletados, em julho de 2011, cinco atributos relacionados à planta: produtividade, índice de maturação, enfolhamento, altura da planta e diâmetro de copa.

A produtividade de café (L.planta^{-1}) foi obtida por meio da colheita manual sobre panos das quatro plantas em torno do ponto amostral, e o volume colhido de cada planta, após a abanação, foi medido em um recipiente graduado em litros. Após esta medição, foi obtida a

média de produção destas quatro plantas, resultando no valor de produtividade para o ponto amostral.

Após as medições de produtividade, os frutos derriçados do conjunto de quatro plantas componentes a este ponto foram colocados em um mesmo recipiente e homogeneizados para se retirar uma amostra de 0,5 L de frutos (CARVALHO et al., 2003; SILVA, 2008). Esse volume foi utilizado para a realização da contagem de frutos para cada maturação (seco, passa, maduro e verde) e transformando-os em porcentagem para que desta maneira pudesse ser utilizada a equação (1), descrita por ALVES et al. (2011), para o cálculo do índice de maturação:

$$\text{índice de maturação} = \sum \% \text{maduro}, \% \text{passa}, \% \text{seco} \quad (1)$$

Para a avaliação do enfolhamento utilizou-se a escala visual proposta por BOLDINI (2001), onde as variações se dão de 0 a 20%, de 21 a 40%, de 41 a 60%, de 61 a 80% e de 81 a 100%.

No conjunto de plantas componentes do ponto amostral foram medidas a altura da planta e o diâmetro de copa, utilizando uma régua graduada em milímetros. A medida da altura da planta foi obtida da parte superior da planta até a superfície do solo. O diâmetro de copa é a medida do ramo de maior comprimento. Após a medição destes atributos foi obtida a média da altura da planta e do diâmetro de copa para cada ponto amostral, em metros.

4.5 Análise geoestatística

A variabilidade espacial da produtividade do cafeeiro foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas, uma vez que variáveis de solo muito próximas podem ser muito diferentes em valores (SANTOS et al., 2003), isto é, as variáveis descritoras das zonas podem apresentar alta variabilidade aleatória. O semivariograma clássico é estimado como:

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

onde, $N(h)$ representa o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separados por uma distância h e o semivariograma é representado através do gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h . Do ajuste do modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita, C_0 ; patamar, C_0+C_1 ; e o alcance, a (CRESSIE, 1993).

Os modelos de semivariogramas foram ajustados pelos métodos de minimização do erro dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS – *ordinary least square*) utilizando o modelo esférico, que segundo WEBSTER & OLIVER (2008), é usado com maior frequência em geoestatística.

A análise geoestatística ocorreu por meio do sistema computacional estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015), utilizando-se a biblioteca geoR (RIBEIRO JR.; DIGGLE, 2001).

4.6 Análise de correlação

Com o intuito de verificar a relação entre a altitude, as características agrônômicas da planta, os atributos de solo e a produtividade do cafeeiro, efetuou-se a análise da medida de

correlação de Pearson, que pode ser utilizada com quaisquer dados de natureza numérica sem qualquer requerimento relacionado à escala de medida ou ao tipo de distribuição das variáveis (ZIMMERMANN, 2014).

Seguindo o método proposto por BAZZI et al. (2013), para identificar os atributos utilizados para geração de zonas de manejo verificou-se quais variáveis possuíam maior correlação com a produtividade, ordenando-as de acordo com os maiores valores de correlação, isto é, as variáveis que possuem a maior correlação se apresentam como candidatas com maiores chances de definir zonas de manejo. Dentre as variáveis que possuíam correlação entre si, verificaram-se aquelas que possuíam a maior correlação absoluta com a produtividade, considerando que se há correlação entre estas, a variável de maior valor absoluto deve ser utilizada na geração de zonas de manejo e as demais eliminadas.

4.7 Definição de zonas de manejo

Zonas de manejo são áreas propícias a receber práticas agronômicas semelhantes, pois apresentam potencial de resposta similar, estando sujeitas as mesmas limitações e riscos do uso agrícola (MIQUELONI et al., 2015). Segundo SANCHEZ et al. (2009), as principais funções de se definir zonas de manejo é aumentar a produtividade e adequar o manejo às especificidades ambientais de cada subárea.

De acordo com ORTEGA & SANTIBÁÑEZ (2007), é mais importante identificar as variáveis que estejam mais relacionadas com a produtividade do que selecionar métodos mais robustos para definir zonas de manejo. Logo, a definição das zonas de manejo utilizou as variáveis que mais se correlacionaram com a produtividade, segundo a metodologia proposta por BAZZI (2011).

Utilizando o software ArcGIS (versão gratuita de teste para estudantes), os intervalos entre grupos das variáveis selecionadas como aptas a criação de zonas de manejo, foram definidos, de forma que os valores preditos deste intervalo fossem iguais para cada área, de acordo com a quantidade de zonas. Para cada variável selecionada, geraram-se mapas de duas, três e quatro zonas de manejo, para verificar o comportamento da média de produtividade por regiões agrupadas.

No intuito de avaliar a influência das variáveis preditoras utilizadas na definição das zonas de manejo, foi necessário avaliar a estatística descritiva destas para cada sub região de duas, três e quatro zonas. Além da análise estatística descritiva destas variáveis, foi necessário verificar o comportamento das variáveis que estiveram correlacionadas com as variáveis preditoras e principalmente o comportamento da produtividade.

Observou-se quais amostras se encontraram em cada sub região e o grupo de amostras foi analisado individualmente de acordo com seus valores das variáveis preditoras, da produtividade e quando houveram das variáveis correlacionadas com as variáveis preditoras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise estatística e da análise de correlação entre atributos químicos do solo, características agronômicas da planta e produtividade, foram utilizados na definição das zonas de manejo para a área de estudo e produção de mapas temáticos de isolinhas.

5.1 Análise descritiva

A análise descritiva dos atributos químicos do solo, assim como das características agronômicas da cultura do café está compilada na Tabela 1. A normalidade foi observada para as variáveis índice de maturação, fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez trocável (Al^{+3}), soma de bases (SB), capacidade efetiva de troca de cátions [CTC(t)], índice de saturação por bases (V), índice de saturação por Al^{+3} (m) e teor de matéria orgânica (MO), segundo o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965). As variáveis altitude, altura de planta, diâmetro de copa, enfolhamento, acidez do solo (pH), potássio (K), acidez potencial (H + Al), capacidade de troca de cátions a pH 7 [CTC(T)], fósforo remanescente (Prem) e produtividade não apresentaram normalidade.

Tabela 1. Análise descritiva dos atributos químicos do solo e das características agrônômicas da cultura do café (Três Pontas, MG, 2011).

Variável	Mínimo	Média	Máximo	D.P.	C.V.	Cs	Ck	S.W.
Altitude (m)	884,66	903,16	914,66	7,31	0,81	-0,47	-0,40	0,069
Altura de planta (m)	1,67	1,92	2,16	0,09	4,77	-0,42	0,92	0,128
Diâmetro de copa (m)	1,54	1,73	1,92	0,09	5,12	-0,07	-0,65	0,391
Índice de Maturação (%)	8,21	64,04	90,77	19,01	29,69	-0,82	0,45	0,006
Enfolhamento (%)	78,75	87,46	95,00	3,21	3,67	-0,03	-0,05	0,418
Acidez (pH)	4,10	4,79	5,90	0,37	7,80	0,56	0,24	0,155
P (mg.dm ⁻³)	1,71	9,33	107,11	14,92	159,83	5,05	30,25	0,000
K (mg.dm ⁻³)	42,12	103,37	199,68	31,90	30,86	0,21	0,29	0,565
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	0,20	1,15	3,20	0,72	62,54	1,02	0,78	0,000
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	0,10	0,22	0,90	0,15	68,57	2,32	7,22	0,000
Al ⁺³ (cmol _c .dm ⁻³)	0,10	0,81	1,80	0,48	58,60	0,14	-0,94	0,022
H + Al (cmol _c .dm ⁻³)	2,90	6,95	12,28	2,03	29,17	0,21	-0,19	0,352
SB (cmol _c .dm ⁻³)	0,41	1,63	4,51	0,91	55,50	1,14	1,40	0,000
t (cmol _c .dm ⁻³)	1,75	2,45	4,61	0,55	22,44	2,02	5,08	0,000
T (cmol _c .dm ⁻³)	5,99	8,58	12,68	1,38	16,09	0,69	0,30	0,061
V (%)	3,22	20,39	60,91	13,12	64,33	1,14	1,05	0,000
m (%)	2,17	36,52	81,52	23,12	63,32	0,16	-1,14	0,008
MO (dag/Kg)	1,64	2,77	4,60	0,46	16,64	0,89	3,17	0,004
Prem (mg.l ⁻¹)	3,92	9,71	16,88	2,97	30,55	-0,12	-0,32	0,103
Produtividade (l.planta ⁻¹)	1,40	4,26	7,45	1,42	33,27	0,15	-0,50	0,565

Mínimo - Valor mínimo; Máximo - Valor máximo; D.P. - Desvio padrão; C.V. - Coeficiente de variação; Cs - Coeficiente de assimetria; Ck - Coeficiente de curtose; S.W. - Teste de normalidade de Shapiro-Wilk

GOMES & GARCIA (2002) afirmam que a magnitude do coeficiente de variação (CV) de um atributo é capaz de classificar sua variabilidade, que pode ser: baixa, quando inferior a 10%; moderada, entre 10 e 20%; alta, entre 20 e 30%; e muita alta quando acima de 30%. Assim, variáveis que apresentem CV menor que 10% podem ser consideradas homogêneas (CARVALHO et al., 2013) e maiores valores de CV podem ser considerados os primeiros indicadores de heterogeneidade dos dados (FROGBROOK et al., 2002). As variáveis altitude, altura de planta, diâmetro de copa, enfolhamento e pH, apresentaram CV baixo. As variáveis CTC(T) e MO apresentaram CV moderado. As variáveis índice de maturação, H + Al e CTC(t) apresentaram um CV alto. As variáveis P, K, Ca, Mg, Al⁺³, SB, V, m, Prem e produtividade apresentaram CV muito alto.

Apesar da variável altitude apresentar CV considerado baixo, seu resultado é similar ao encontrado por BAZZI (2011). Os resultados referentes às variáveis pH, H + Al, Al⁺³, Ca e Mg são semelhantes aos encontrados por SANTOS et al. (2014). O resultado da variável SB é similar ao encontrado por SILVA et al. (2010) quando se verificou um cultivo convencional. O resultado das variáveis P, K, T, m e MO é semelhante ao encontrado por SILVA & LIMA (2012). O resultado das variáveis altura de planta e produtividade é semelhante ao encontrado por CARVALHO et al. (2013), sendo a produtividade também similar aos encontrados por SILVA & LIMA (2013) e FONSECA et al. (2015).

Os coeficientes de Assimetria e Curtose são utilizados para observar a distribuição estatística das variáveis (MAPA & KUMARAGAMAGE, 1996) e ambos devem ser próximos de zero, embora alguns softwares utilizem valores de Curtose próximos de 3 (SILVA et al., 2008).

Ao se analisar os valores mínimos e máximos, assim como a média, é possível verificar grande variação nos dados. Contudo, apenas o conhecimento dessa amplitude é insuficiente para identificar os locais onde se encontram os maiores teores e os locais onde se encontram os menores teores de uma determinada variável. Dessa forma, torna-se necessário utilizar ferramentas geoestatísticas, que possibilitem identificar a variabilidade espacial dos dados.

5.2 Análise de correlação

Utilizando todas as variáveis [altitude, altura de planta, diâmetro de copa, índice de maturação, enfolhamento, P, K, Ca, Mg, pH, Al+3, H + Al, SB, CTC(t), CTC(T), V, m, MO, Prem] e como variável principal a produtividade, foi possível efetuar a análise de correlação de Pearson (Tabela 2).

Tabela 2. Matriz de correlação das variáveis estudadas.

Variável	Altitude	Altura de Planta	Diâmetro de Copa	Índice de Maturação	Enfolhamento	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al	SB	CTC(t)	CTC(T)
Altitude	1														
Altura de Planta	-0,0923	1													
Diâmetro de Copa	0,0692	0,3214	1												
Índice de Maturação	0,5661	-0,1470	-0,1167	1											
Enfolhamento	-0,1622	0,2426	-0,0693	-0,1057	1										
pH	-0,2986	-0,1508	0,0395	-0,2015	-0,0930	1									
P	0,2301	0,1186	0,0055	0,1181	0,0888	-0,2291	1								
K	-0,1711	0,1151	-0,0241	-0,0923	0,0038	0,7198	-0,2363	1							
Ca	-0,2701	-0,1743	0,0040	-0,0827	-0,0396	0,9182	-0,1720	0,6460	1						
Mg	-0,1157	-0,0734	0,0474	0,0268	-0,0602	0,8598	-0,1131	0,6400	0,8533	1					
Al	0,3028	0,2455	0,0786	0,1526	0,0289	-0,9005	0,1617	-0,5910	-0,8692	-0,7335	1				
H + Al	0,2199	0,1502	0,0395	0,1344	-0,0164	-0,8707	0,0766	-0,5733	-0,8164	-0,7499	0,9412	1			
SB	-0,2488	-0,1400	0,0089	-0,0694	-0,0410	0,9354	-0,1764	0,7085	0,9925	0,9000	-0,8641	-0,8233	1		
CTC(t)	-0,1474	-0,0177	0,0829	0,0180	-0,0426	0,7610	-0,1506	0,6555	0,8824	0,8476	-0,5568	-0,5406	0,8992	1	
CTC(T)	0,1596	0,1286	0,0639	0,1518	-0,0510	-0,6646	-0,0033	-0,3769	-0,5474	-0,5104	0,8149	0,9280	-0,5526	-0,2037	1
V	-0,2543	-0,1394	0,0050	-0,1000	-0,0169	0,9463	-0,1536	0,6862	0,9707	0,9081	-0,8954	-0,8872	0,9820	0,8422	-0,6582
m	0,3205	0,2256	0,0916	0,1460	0,0233	-0,9130	0,2032	-0,6646	-0,9034	-0,7440	0,9776	0,8960	-0,8995	-0,6348	0,7253
MO	0,1978	-0,0745	0,1004	0,1398	-0,2839	0,1710	-0,2449	0,1205	0,0753	0,1833	0,0200	0,1516	0,1009	0,1839	0,2888
Prem	0,3986	0,1599	-0,0503	0,1254	0,3849	0,0957	0,2376	0,2284	0,0488	0,1582	-0,1180	-0,2151	0,0855	0,0386	-0,2597
Prod	-0,4531	0,0936	0,2527	-0,1591	-0,0686	0,3833	-0,2608	0,3267	0,3856	0,3079	-0,3281	-0,2452	0,3862	0,3522	-0,1066

Nível de significância de 5%: não significativo, **significativo**.

A análise evidenciou que as variáveis altura de planta, índice de maturação, enfolhamento, H + Al, CTC(T), MO e Prem não se mostraram correlacionados com a produtividade. Foi possível observar correlação entre a produtividade e as variáveis altitude, diâmetro de copa, pH, P, K, Ca, Mg, Al, SB, CTC(t), V e m.

A correlação com a produtividade foi negativa para as variáveis altitude, P, Al e m, indicando que enquanto os seus valores diminuía, o valor da produtividade aumentava. As demais apresentaram correlação positiva, indicando que conforme suas concentrações aumentavam, os valores da produtividade aumentavam.

Com o objetivo de selecionar as camadas para a geração das zonas de manejo, eliminaram-se as variáveis altura de planta, índice de maturação, enfolhamento, H + Al, CTC(T), MO e Prem, que não se apresentaram correlacionadas com a produtividade.

Em seguida, verificaram-se quais variáveis (que se apresentaram significativamente correlacionadas com a produtividade) estavam correlacionadas entre si. A variável altitude se apresentou correlacionada com as variáveis pH, Ca, Al, SB, V, m e Prem, apresentando valor absoluto de correlação com a produtividade superior a todas estas. As variáveis diâmetro de copa e P apresentaram correlação apenas com a produtividade. A Tabela 3 apresenta a ordenação das variáveis de acordo com o nível de correlação de cada uma com a produtividade.

Tabela 3. Ordem de classificação das variáveis candidatas a elaboração das zonas de manejo à um nível de significância de 5%.

Variáveis	Altitude	Fósforo (P)	Diâmetro de Copa
Correlação	-0,4531	-0,2608	0,2527
Ordem	1	2	3

Verificou-se que as variáveis: altitude, P e diâmetro de copa apresentaram correlação com a produtividade, onde apenas a variável altitude apresentou correlação significativa com outras variáveis que também estavam correlacionadas com a produtividade, entretanto seu valor absoluto de correlação superou do valor das demais e segundo BAZZI et al. (2015) deve ser utilizado com referência dessas variáveis.

5.3 Análise Geoestatística

A análise geoestatística é uma ferramenta importante na verificação da dependência espacial das variáveis que constituiriam cada conjunto de dados para gerar zonas de manejo, conforme propôs RODRIGUES JUNIOR et al. (2011).

Com o intuito de verificar a variabilidade espacial das variáveis candidatas a geração de zonas de manejo, utilizou-se a metodologia de análise geoestatística e foi possível quantificar a dependência espacial destas variáveis, o que pode ser observado na Tabela 4 e na Figura 2.

Tabela 4. Parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais pelo método OLS e modelo esférico.

Variável	C_0	C_1	$C_0 + C_1$	a	GD [$C_0/(C_0+C_1)$]
Altitude (m)	0,000	65,253	65,253	315,95	0,00 Forte
Diâmetro de copa (m)	0,002	0,006	0,008	120,00	21,05 Forte
P (mg.dm ⁻³)	45,77	132,80	178,57	56,74	25,63 Moderado

C_0 – Efeito Pepita; C_1 – Contribuição; $C_0 + C_1$ – Patamar; a – Alcance; GD – Grau de dependência.

O efeito pepita é um importante parâmetro do semivariograma, e indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada. Percebeu-se que o efeito

pepita zero foi encontrado para a variável altitude, sendo muito próxima de zero (0,002) para a variável diâmetro de copa.

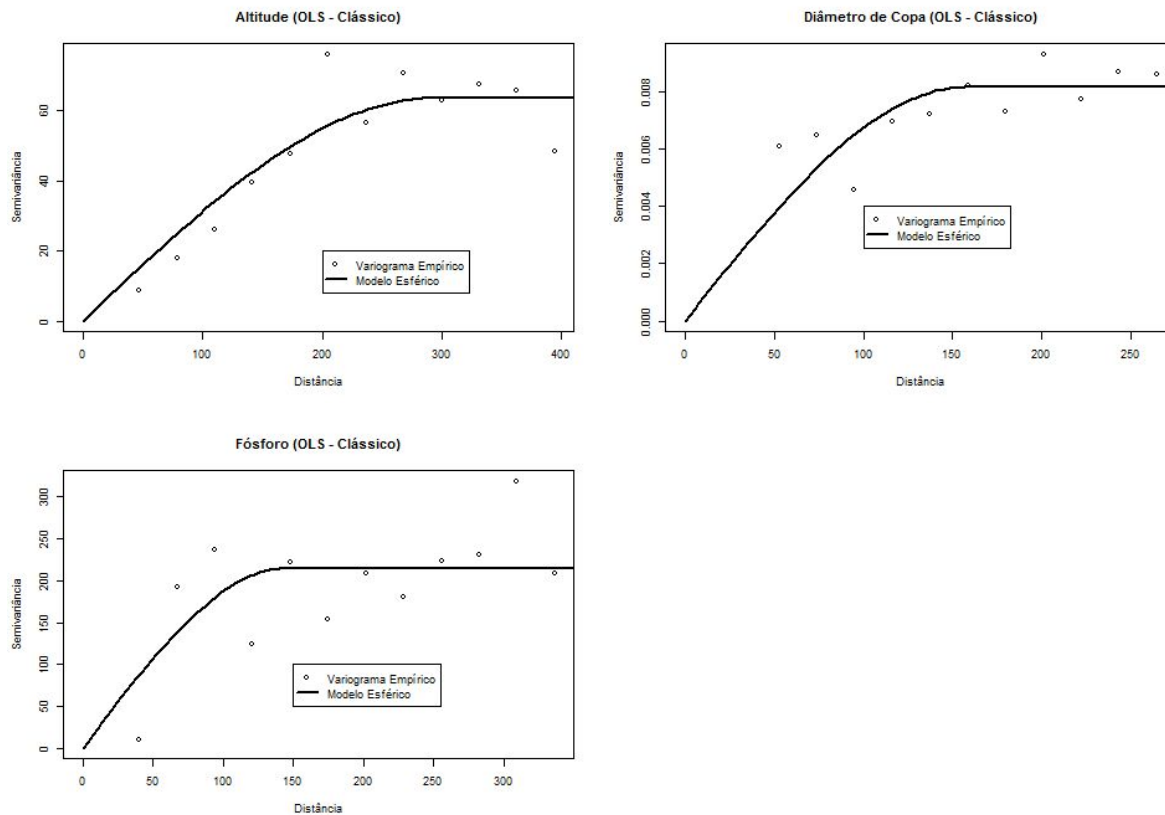


Figura 2. Semivariogramas das variáveis (a) altitude, (b) diâmetro de copa e (c) fósforo (P).

Os valores do alcance dos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, podendo ser um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGMAR et al., 1985) ou, ainda, dos atributos relacionados às plantas (FERRAZ et al., 2012a).

Segundo a metodologia proposta por CAMBARDELLA et al. (1994), a dependência espacial pode ser analisada através do grau de dependência (GD), razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$). Assim, a altitude e o diâmetro de copa apresentaram dependência espacial forte e o fósforo apresentou dependência espacial moderada.

5.4 Definição das Zonas de Manejo

Uma vez que as variáveis: altitude, P e diâmetro de copa foram selecionadas como as melhores opções pela matriz de correlação espacial, estas foram utilizadas na definição das zonas de manejo. A categorização das zonas de manejo respeitou a divisão idêntica no intervalo de valores mínimos e máximos das amostras e as regiões foram classificadas e denominadas zonas de valores “baixos” e “altos” para duas zonas de manejo, “baixos”, “médios” e “altos” para três zonas de manejo, e “baixos”, “entre baixos e médios”, “entre médios e altos” e “altos” para quatro zonas de manejo.

Haja vista que a variável altitude apresentou correlação significativa com diversos atributos referentes às características químicas do solo, a estatística descritiva destes atributos foi verificada pelas zonas definidas por pela altitude em duas (Tabela 5), três (Tabela 6) e quatro (Tabela 7) zonas de manejo. Cabe ressaltar que a correlação entre a

produtividade e a altitude foi negativa e verificou-se que a média da produtividade foi superior na zona de baixas altitudes e inferior nas zonas de maiores altitudes.

De acordo com BAZZI (2011), o potencial produtivo da área é levado em consideração para a definição de zonas de manejo, contudo é importante avaliar se as regiões geradas podem servir como fonte para análises e recomendações. Logo, a produtividade foi utilizada na verificação da qualidade das zonas de manejo geradas através da metodologia proposta.

Tabela 5. Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável altitude para duas zonas de manejo.

Zona	Variável	Média	D.P.	Var	CV	Ck	Cs	Mínimo	Máximo
Baixa	Altitude	894,33	4,12	17,01	0,01	0,13	-1,08	884,66	898,64
	Acidez (pH)	4,97	0,35	0,12	0,07	-0,99	-0,03	4,40	5,60
	Ca ⁺²	1,57	0,77	0,60	0,49	-0,68	0,32	0,50	3,20
	Al ⁺³	0,58	0,46	0,21	0,80	-0,73	0,77	0,10	1,50
	SB	2,13	0,97	0,95	0,46	-0,36	0,39	0,74	4,26
	V	27,46	14,56	212,85	0,53	-0,68	0,33	7,80	56,85
	m	24,59	21,79	474,73	0,89	-0,83	0,80	2,29	63,60
	Prem	7,78	3,03	9,16	0,39	-1,66	0,23	3,92	12,13
	Produtividade e	5,14	1,21	1,45	0,23	-0,34	-0,07	3,02	7,45
Alta	Altitude	907,17	4,24	17,97	0,01	-1,23	0,10	900,27	914,66
	Acidez (pH)	4,70	0,36	0,13	0,08	1,97	0,97	4,10	5,90
	Ca ⁺²	0,96	0,61	0,37	0,64	3,72	1,51	0,20	3,10
	Al ⁺³	0,92	0,45	0,20	0,49	-0,58	-0,02	0,10	1,80
	SB	1,41	0,79	0,62	0,56	5,15	1,75	0,41	4,51
	V	17,18	11,15	124,27	0,65	4,60	1,75	3,22	60,91
	m	41,94	21,85	477,44	0,52	-0,92	-0,01	2,17	81,52
	Prem	10,59	2,52	6,34	0,24	0,37	0,16	5,01	16,88
	Produtividade e	3,86	1,34	1,78	0,35	-0,10	0,38	1,4	7,27

Mínimo - Valor mínimo; Máximo - Valor máximo; D.P. - Desvio padrão; Var - variância; C.V. - Coeficiente de variação; Cs - Coeficiente de assimetria; Ck - Coeficiente de curtose

Ao se definir duas zonas de manejo, utilizando a variável altitude, verificou-se que a zona considerada de baixa altitude (entre 884,66 m e 898,64 m) teve área de 5,3 ha enquanto a zona de maiores altitudes (entre 900,27 m e 914,66 m) teve 15,9 ha.

O valor do CV da variável produtividade na zona de baixas altitudes foi considerado alto (23%) e na zona de altas altitudes foi considerado muito alto (35%). Observou-se que a média da produtividade foi de 5,14 litros.planta⁻¹ na zona de menores altitudes enquanto foi de 3,86 litros.planta⁻¹ na região de maiores altitudes.

Tabela 6. Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável altitude para três zonas de manejo.

Zona	Variável	Média	D.P.	Var	C.V.	Ck	Cs	Mínimo	Máximo
Baixa	Z	888,80	2,73	7,47	0,00	0,32	-0,22	884,66	892,63
	pH	4,97	0,31	0,10	0,06	-0,03	-0,12	4,50	5,40
	Ca	1,42	0,70	0,49	0,49	0,10	0,37	0,50	2,50
	Al	0,55	0,45	0,20	0,82	-0,04	1,18	0,20	1,30
	SB	1,91	0,85	0,73	0,45	0,56	0,31	0,74	3,25
	V	26,30	13,75	189,00	0,52	0,11	0,24	7,80	47,31
	m	24,70	22,66	513,62	0,92	0,56	1,27	5,80	63,60
	Prem	10,66	1,38	1,91	0,13	-2,47	-0,20	8,87	12,13
	Produtividade	e	5,22	1,24	1,54	0,24	2,24	-1,07	3,02
Média	Z	899,62	3,08	9,51	0,00	-1,57	-0,17	894,88	904,12
	pH	4,90	0,32	0,10	0,07	-0,57	0,48	4,40	5,60
	Ca	1,35	0,66	0,44	0,49	0,94	1,03	0,50	3,20
	Al	0,67	0,40	0,16	0,60	-0,84	0,08	0,10	1,50
	SB	1,89	0,83	0,69	0,44	1,21	1,04	0,76	4,26
	V	23,51	12,52	156,84	0,53	0,63	1,03	7,95	56,85
	m	28,79	18,84	354,91	0,65	-1,02	0,17	2,29	61,88
	Prem	8,36	3,00	9,01	0,36	-1,36	0,05	3,92	14,17
	Produtividade	e	4,81	1,25	1,57	0,26	-0,37	0,33	2,82
Alta	Z	909,68	2,84	8,09	0,00	-0,95	0,11	905,12	914,66
	pH	4,63	0,38	0,15	0,08	3,03	1,36	4,10	5,90
	Ca	0,89	0,71	0,51	0,80	3,35	1,74	0,20	3,10
	Al	1,01	0,49	0,24	0,48	-0,88	-0,26	0,10	1,80
	SB	1,32	0,92	0,84	0,69	4,86	1,99	0,41	4,51
	V	16,05	12,63	159,46	0,79	4,77	1,94	3,22	60,91
	m	46,70	23,61	557,27	0,50	-1,07	-0,36	2,17	81,52
	Prem	10,87	2,65	7,00	0,24	0,28	0,24	5,01	16,88
	Produtividade	e	3,52	1,26	1,60	0,36	-0,01	0,46	1,40

Mínimo - Valor mínimo; Máximo - Valor máximo; D.P. - Desvio padrão; Var - variância; C.V. - Coeficiente de variação; Cs - Coeficiente de assimetria; Ck - Coeficiente de curtose

Definindo três zonas de manejo, utilizando a variável altitude, observou-se que a zona considerada de baixa altitude (entre 884,66 m e 892,63 m) ocupou uma área de 1,84 ha, a zona de altitudes médias (entre 894,98 m e 904,12 m) 9,34 ha e a zona de maiores altitudes (entre 905,12 m e 914,66 m) 10 ha.

O valor do CV da variável produtividade na zona de baixas e médias altitudes foi considerado alto (24% e 26%, respectivamente) e na zona de altas altitudes foi considerado muito alto (36%). Verificou-se que a média da produtividade foi de 5,22 litros.planta⁻¹, 4,81 litros.planta⁻¹ e 3,52 litros.planta⁻¹, para as regiões de baixas, médias e altas altitudes, respectivamente.

Tabela 7. Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável altitude para quatro zonas de manejo.

Zona	Variável	Média	D.P.	Var	C.V.	Ck	Cs	Mínimo	Máximo
Baixa	Z	888,03	2,22	4,92	0,00	0,41	-0,91	884,66	890,38
	pH	5,06	0,24	0,06	0,05	-0,95	0,60	4,80	5,40
	Ca	1,60	0,60	0,36	0,38	0,74	0,71	0,90	2,50
	Al	0,40	0,29	0,09	0,73	3,38	1,82	0,20	0,90
	SB	2,15	0,71	0,50	0,33	1,43	0,92	1,35	3,25
	V	30,01	11,55	133,51	0,39	1,01	0,62	16,10	47,32
	m	16,91	13,71	187,95	0,81	2,71	1,65	5,80	39,96
	Prem	11,02	1,19	1,42	0,11	-2,91	-0,58	9,56	12,13
	Produtividad e	5,66	0,69	0,48	0,12	1,69	0,99	4,88	6,75
	Média Baixa	Z	896,43	1,66	2,75	0,00	0,29	-0,57	892,63
pH		4,95	0,38	0,14	0,08	-1,24	0,10	4,40	5,60
Ca		1,56	0,84	0,71	0,54	-0,86	0,33	0,50	3,20
Al		0,64	0,50	0,25	0,78	-1,21	0,51	0,10	1,50
SB		2,12	1,07	1,14	0,50	-0,60	0,37	0,74	4,26
V		26,60	15,74	247,62	0,59	-0,77	0,42	7,80	56,85
m		27,15	23,72	562,48	0,87	-1,36	0,56	2,29	63,60
Prem		6,70	2,65	7,04	0,40	-0,32	0,99	3,92	12,13
Produtividad e		4,97	1,31	1,71	0,26	-0,51	0,22	3,03	7,45
Média Alta		Z	903,18	1,75	3,05	0,00	-0,53	0,56	900,27
	pH	4,79	0,27	0,07	0,06	1,12	0,71	4,40	5,50
	Ca	1,04	0,37	0,14	0,36	-0,34	-0,38	0,30	1,70
	Al	0,81	0,35	0,12	0,43	-0,11	-0,32	0,10	1,40
	SB	1,52	0,48	0,23	0,31	-0,36	-0,35	0,58	2,37
	V	18,50	7,94	63,08	0,43	1,45	0,92	6,15	39,57
	m	35,60	17,18	295,22	0,48	-0,08	0,16	4,05	70,85
	Prem	9,79	2,24	5,00	0,23	0,50	-0,59	5,01	14,17
	Produtividad e	4,35	1,20	1,45	0,28	0,22	0,58	2,83	7,28
	Alta	Z	910,50	2,37	5,61	0,00	-1,01	0,25	907,03
pH		4,62	0,41	0,16	0,09	3,13	1,46	4,10	5,90
Ca		0,89	0,75	0,57	0,85	3,42	1,83	0,20	3,10
Al		1,01	0,51	0,26	0,50	-0,87	-0,25	0,10	1,80
SB		1,31	0,97	0,95	0,74	4,82	2,07	0,41	4,51
V		16,08	13,32	177,45	0,83	4,81	2,01	3,22	60,91
m		47,22	24,18	584,74	0,51	-1,00	-0,42	2,17	81,52
Prem		11,26	2,59	6,70	0,23	-0,31	0,38	7,24	16,88
Produtividad e		3,46	1,33	1,76	0,38	0,08	0,57	1,40	6,70

Mínimo - Valor mínimo; Máximo - Valor máximo; D.P. - Desvio padrão; Var - variância; C.V. - Coeficiente de variação; Cs - Coeficiente de assimetria; Ck - Coeficiente de curtose

Utilizando quatro zonas de manejo, baseando-se na variável altitude, verificou-se que a zona considerada de baixa altitude ocupou uma área aproximada de 1 ha, a zona de altitudes entre baixas e médias 4,3 ha, a zona de altitudes entre médias e altas 8,5 ha, e a zona de maiores altitudes 7,4 ha.

O valor do CV da variável produtividade na zona de baixas altitudes foi considerado moderado (12%), nas zonas de altitudes entre baixas e médias, e médias e altas foi considerado alto (26% e 28%, respectivamente) e na zona de altas altitudes foi considerado muito alto (38%). Verificou-se que a média da produtividade foi de 5,66 litros.planta⁻¹, 4,97 litros.planta⁻¹, 4,35 litros.planta⁻¹ e 3,46 litros.planta⁻¹, para as regiões de baixas, entre baixas e médias, entre médias e altas, e altas altitudes, respectivamente.

As variáveis P e diâmetro de copa não apresentaram correlação significativa com quaisquer variáveis e as zonas de manejo definidas por estas variáveis apresentam características específicas de acordo com suas particularidades e necessidades de correção. Dessa forma, verificou-se a estatística descritiva destes atributos apenas junto com a

produtividade dentro de cada zona definida, sendo seu resultado apresentado nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8. Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável diâmetro de copa para duas, três e quatro zonas de manejo.

Zonas	Variável	Média	D.P.	Var	C.V.	Ck	Cs	Mínimo	Máximo
Baixa (2 Zonas)	Diâmetro de copa	1,70	0,08	0,01	0,05	-1,10	-0,12	1,54	1,83
	Produtividade	4,00	1,46	2,13	0,37	-0,50	0,26	1,40	7,45
Alta (2 Zonas)	Diâmetro de copa	1,78	0,08	0,01	0,04	-0,67	-0,06	1,63	1,92
	Produtividade	4,68	1,27	1,61	0,27	-0,46	0,27	2,65	7,28
Baixa (3 Zonas)	Diâmetro de copa	1,67	0,07	0,01	0,04	-0,63	0,03	1,54	1,81
	Produtividade	3,71	1,70	2,90	0,46	-0,33	0,61	1,40	7,45
Média (3 Zonas)	Diâmetro de copa	1,73	0,08	0,01	0,05	-0,49	0,00	1,57	1,92
	Produtividade	4,31	1,16	1,34	0,27	-0,53	0,06	1,73	6,75
Alta (3 Zonas)	Diâmetro de copa	1,80	0,07	0,01	0,04	1,11	-0,66	1,63	1,92
	Produtividade	4,76	1,44	2,07	0,30	-0,75	0,20	2,65	7,28
Baixa (4 Zonas)	Diâmetro de copa	1,67	0,08	0,01	0,04	-0,32	0,03	1,54	1,81
	Produtividade	3,79	1,90	3,60	0,50	-0,82	0,46	1,40	7,45
Média Baixa (4 Zonas)	Diâmetro de copa	1,72	0,08	0,01	0,05	-1,25	-0,41	1,57	1,83
	Produtividade	4,09	1,20	1,45	0,29	-0,45	0,35	1,73	6,75
Média Alta (4 Zonas)	Diâmetro de copa	1,75	0,08	0,01	0,05	0,13	1,00	1,66	1,92
	Produtividade	4,84	1,19	1,43	0,25	0,38	0,56	3,23	7,28
Alta (4 Zonas)	Diâmetro de copa	1,80	0,08	0,01	0,04	0,77	-0,65	1,63	1,92
	Produtividade	4,58	1,37	1,87	0,30	-0,83	0,16	2,65	6,90

Mínimo - Valor mínimo; Máximo - Valor máximo; D.P. - Desvio padrão; Var - variância; C.V. - Coeficiente de variação; Cs - Coeficiente de assimetria; Ck - Coeficiente de curtose

Ao se classificar a região de estudo em duas zonas e utilizando a variável diâmetro de copa, verificou-se que a zona que concentrou os menores valores ocupou uma área de 12,2 ha e a zona que concentrou os maiores valores 9 ha.

O valor do CV da produtividade na divisão de duas zonas de manejo e utilizando a variável diâmetro de copa, na região de baixos valores de diâmetro de copa foi considerado muito alto (37%) e na região definida pelos maiores valores foi considerado alto (27%). Observou-se que a média da produtividade foi de 4,00 litros.planta⁻¹ na zona de menores valores de diâmetros de copa enquanto foi de 4,68 litros.planta⁻¹ na região de maiores valores.

Definindo três zonas de manejo e utilizando a variável diâmetro de copa, verificou-se que a zona que concentrou os menores valores ocupou uma área de 6,2 ha, a zona que reuniu os valores médios de diâmetro de copa ocupou 10,2 ha e a zona que concentrou os maiores valores ocupou 4,8 ha.

O valor do CV da produtividade na divisão de três zonas de manejo e utilizando a variável diâmetro de copa, na região de baixos valores de diâmetro de copa foi considerado muito alto (46%), na zona de valores médios da variável diâmetro de copa foi considerado alto (27%) e na região definida pelos maiores valores foi considerado alto (30%). Foi possível verificar que a média da produtividade foi de 3,71 litros.planta⁻¹, 4,31 litros.planta⁻¹ e 4,76 litros.planta⁻¹, para as regiões de baixos, médios e altos diâmetros de copa, respectivamente.

Classificando a área em quatro zonas de manejo e utilizando a variável diâmetro de copa, verificou-se que a zona que concentrou os menores valores ocupou uma área de 4,5 ha,

as zonas que concentraram os valores entre baixos e médios e entre médios e altos ocuparam respectivamente 7,8 ha e 5,4 ha e a zona que concentrou os maiores valores ocupou 3,6 ha.

O valor do CV da produtividade na divisão de quatro zonas de manejo e utilizando a variável diâmetro de copa, na região de baixos valores de diâmetro de copa foi considerado muito alto (50%), nas regiões em que as zonas que concentraram os valores entre baixos e médios e entre médios e altos foi considerado alto (29% e 25%, respectivamente), assim como na região definida pelos maiores valores (30%). Verificou-se que a média da produtividade foi de 3,79 litros.planta⁻¹, 4,09 litros.planta⁻¹, 4,84 litros.planta⁻¹ e 4,58 litros.planta⁻¹, para as regiões de baixos, entre baixos e médios, entre médios e altos, e altos diâmetros de copa, respectivamente.

Tabela 9. Estatística descritiva dos atributos correlacionados com a produtividade do cafeeiro e com a variável fósforo para duas, três e quatro zonas de manejo.

Zonas	Variável	Média	D.P.	Var	C.V.	Ck	Cs	Mínim o	Máxim o
Baixa (2 Zonas)	P	7,11	6,48	41,97	0,91	7,50	2,57	1,71	34,00
	Produtividade	4,33	1,40	1,95	0,32	-0,41	0,12	1,40	7,45
Alta (2 Zonas)	P	78,15	40,95	0	0,52	*	*	49,19	107,11
	Produtividade	2,35	0,18	0,03	0,08	*	*	2,23	2,48
Baixa (3 Zonas)	P	6,47	5,49	30,09	0,85	8,95	2,66	1,71	31,99
	Produtividade	4,41	1,36	1,85	0,31	-0,40	0,16	1,63	7,45
Média (3 Zonas)	P	16,36	12,64	159,88	0,77	1,01	1,30	6,50	34,00
	Produtividade	3,13	1,59	2,53	0,51	1,73	0,71	1,40	5,25
Alta (3 Zonas)	P	78,15	40,95	0	0,52	*	*	49,19	107,11
	Produtividade	2,35	0,18	0,03	0,08	*	*	2,23	2,48
Baixa (4 Zonas)	P	6,11	4,63	21,43	0,76	4,25	1,94	1,71	24,60
	Produtividade	4,48	1,35	1,82	0,30	-0,41	0,12	1,63	7,45
Média Baixa (4 Zonas)	P	15,00	12,33	152,04	0,82	-0,79	1,22	6,50	34,00
	Produtividade	3,12	1,24	1,54	0,40	0,72	0,38	1,40	5,25
Média Alta (4 Zonas)	P	49,19	*	*	*	*	*	49,19	49,19
	Produtividade	2,48	*	*	*	*	*	2,48	2,48
Alta (4 Zonas)	P	107,11	*	*	*	*	*	107,11	107,11
	Produtividade	2,23	*	*	*	*	*	2,23	2,23

Mínimo - Valor mínimo; Máximo - Valor máximo; D.P. - Desvio padrão; Var - variância; C.V. - Coeficiente de variação; Cs - Coeficiente de assimetria; Ck - Coeficiente de curtose. * não houve amostras suficientes para se efetuar o cálculo estatístico.

Ao se classificar a região de estudo em duas zonas e utilizando a variável fósforo, verificou-se que a zona que concentrou os menores valores ocupou uma área de 20,1 ha e a zona que concentrou os maiores valores ocupou 1,1 ha.

O valor do CV da produtividade na divisão de duas zonas de manejo e utilizando a variável fósforo, na região de baixos valores foi considerado muito alto (32%) e na região definida pelos maiores valores foi considerado muito baixo (8%). Observou-se que a média da produtividade foi de 4,33 litros.planta⁻¹ na zona de menores valores de fósforo enquanto foi de 2,35 litros.planta⁻¹ na região de maiores valores.

Definindo três zonas de manejo e utilizando a variável fósforo, verificou-se que a zona que concentrou os menores valores ocupou uma área de 18,9 ha, a zona que reuniu os valores médios ocupou 1,8 ha e a zona que concentrou os maiores valores ocupou 0,5 ha.

O valor do CV da produtividade na divisão de três zonas de manejo e utilizando a variável fósforo, na região de baixos e de médios valores foi considerado muito alto (31% e 51%, respectivamente), e na região definida pelos maiores valores foi considerado muito baixo (8%). Foi possível verificar que a média da produtividade foi de 4,41 litros.planta⁻¹,

3,13 litros.planta⁻¹ e 2,35 litros.planta⁻¹, para as regiões de baixos, médios e altos valores de fósforo, respectivamente.

Classificando a área em quatro zonas de manejo e utilizando a variável fósforo, verificou-se que a zona que concentrou os menores valores ocupou uma área de 18 ha, as zonas que concentraram os valores entre baixos e médios e entre médios e altos ocuparam 2,1 ha e 0,8 ha, respectivamente e a zona que concentrou os maiores valores ocupou 0,25 ha.

O valor do CV da produtividade na divisão de quatro zonas de manejo e utilizando a variável fósforo, na região de baixos valores foi considerado alto (30%), nas regiões em que as zonas que concentraram os valores entre baixos e médios foi considerado muito alto (40%) e na zona de valores médios e altos, assim como na zona de valores altos, não foi possível calcular o CV, uma vez que essas regiões concentraram apenas uma amostra. Verificou-se que a média da produtividade foi de 4,48 litros.planta⁻¹, 3,12 litros.planta⁻¹, 2,48 litros.planta⁻¹ e 2,23 litros.planta⁻¹, para as regiões de baixos, entre baixos e médios, entre médios e altos, e altos valores de fósforo, respectivamente.

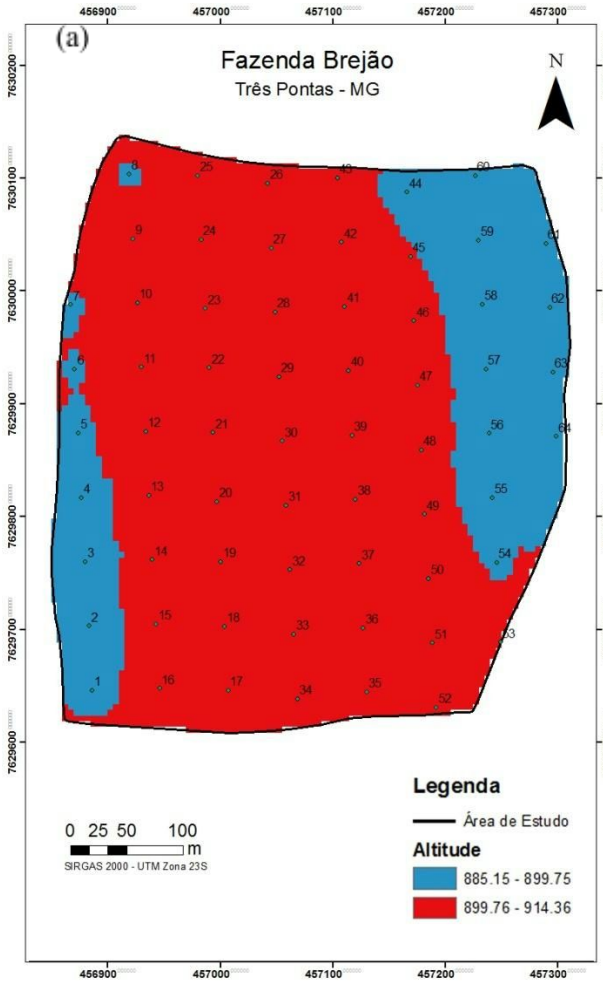
Confirmando os resultados da análise de correlação, as variáveis altitude, fósforo e diâmetro de copa, quando utilizadas na definição de zonas de manejo influenciaram a média da produtividade. No caso das variáveis altitude e fósforo que possuem correlação negativa com a produtividade, observou-se que as zonas que concentram maiores valores de altitude e fósforo apresentaram menores médias de produtividade. Nas zonas geradas pela variável diâmetro de copa, que possui correlação positiva com a produtividade, foi possível observar que as médias de produtividade acompanharam o comportamento das zonas, ou seja, zonas de baixos valores de diâmetro de copa possuíram menores valores médios de produtividade e zonas de maiores valores de diâmetro de copa possuíram maiores valores médios de produtividade. Esta relação entre variáveis utilizadas para geração de zonas de manejo também foi encontrada por BAZZI (2011), quando testaram a influência de atributos de solo na definição de unidades de manejo para identificar locais com maior potencial à lixiviação.

5.5 Elaboração de mapas temáticos de zonas de manejo

Utilizando as análises descritivas das zonas de manejo geradas, é possível gerar mapas temáticos capazes de auxiliar a tomada de decisões do produtor cafeeiro. Foram gerados três mapas (duas, três e quatro categorias) para cada variável candidata a definição de zonas de manejo para a área de estudo.

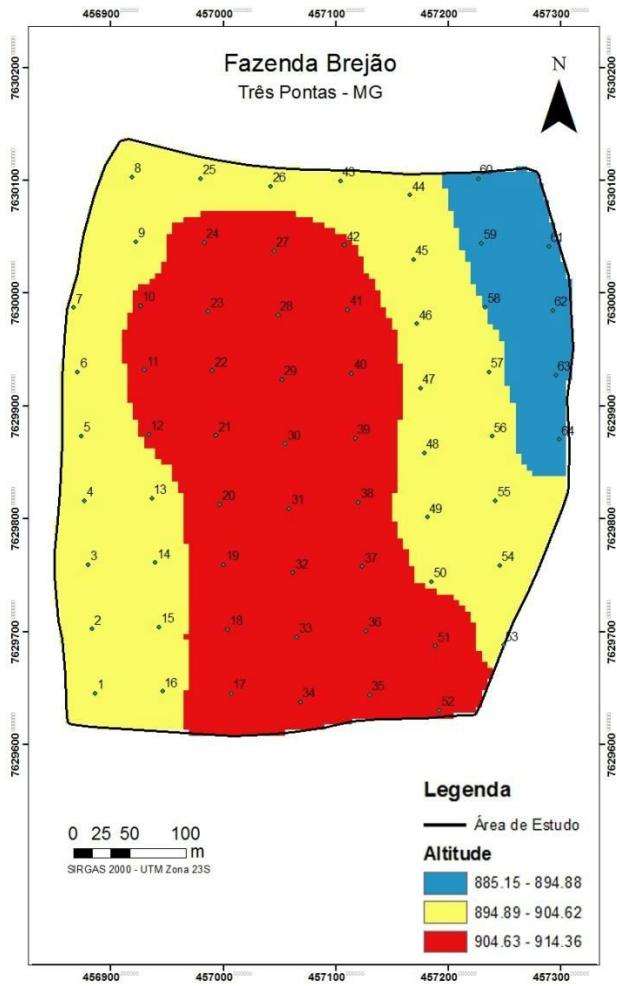
Utilizando o software ArcGIS (versão gratuita de teste para estudantes) efetuou-se a interpolação dos pontos segundo seus valores de altitude, diâmetro de copa e fósforo, utilizando uma interpolação baseada no modelo matemático denominado “inverso das distâncias”, isto é, o modelo supõe que quanto mais próximos dois pontos estejam, maior é a probabilidade de correlação entre eles. Posteriormente seu resultado foi classificado em duas, três e quatro categorias. Os mapas de zonas de manejo da variável altitude são apresentados na Figura 4, da variável diâmetro de copa na Figura 5 e da variável fósforo (P) na Figura 6.

Cabe ressaltar que pela importância das zonas geradas pela variável altitude, uma vez que esta variável está correlacionada com diversas variáveis além da produtividade, a Figura 1b apresenta o comportamento do relevo da área estudada.



(b)

(c)



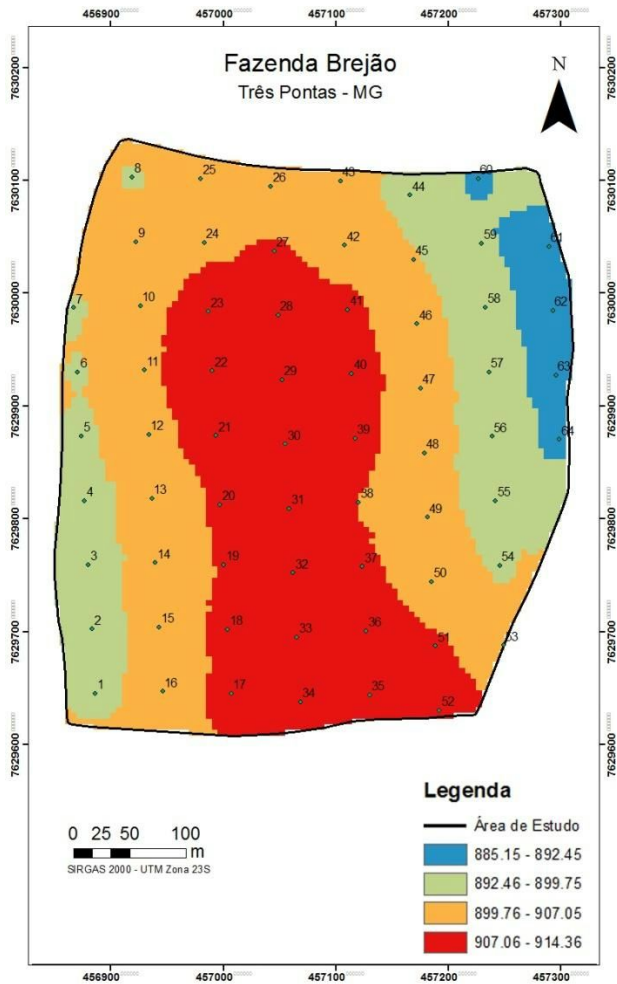
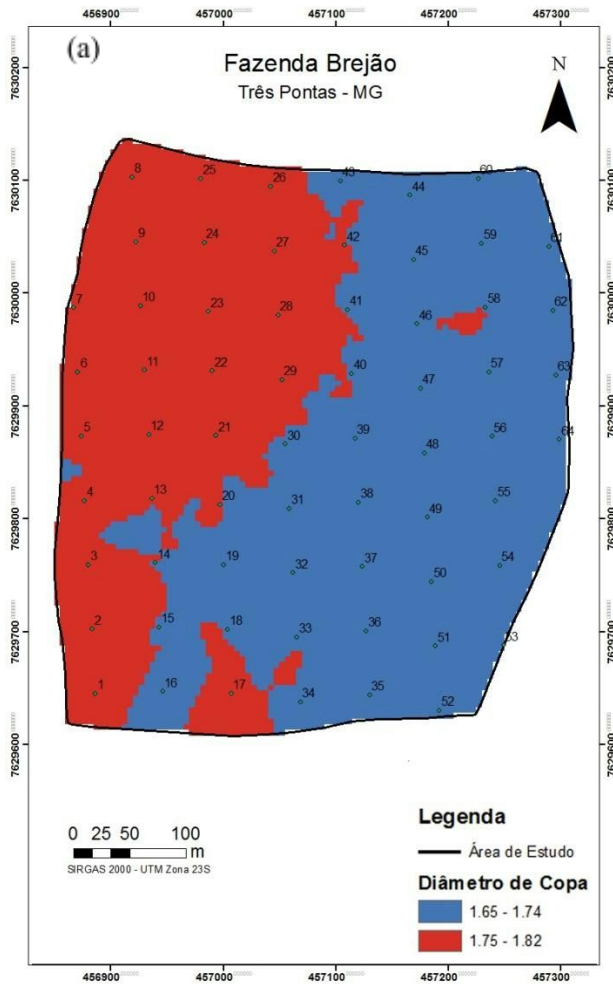


Figura 3. Zonas de manejo segundo a variável altitude: (a) duas zonas, (b) três zonas e (c) quatro zonas.

Nas zonas de manejo geradas utilizando a variável altitude é possível observar que os grupos ficaram mais delineados quando foram consideradas duas e três classes, mesmo que no primeiro mapa (Figura 3a) a classe de maiores altitudes divida a classe de menores altitudes geograficamente e que tenha havido uma leve invasão de sub-parcelas de zonas distintas, que pode ser observado a noroeste do mapa. O mapa gerado para quatro zonas de manejo (Figura 3c) apresentou comportamento semelhante ao primeiro mapa, tendo subgrupos se alinhando em zonas distintas. Estes resultados se assemelham aos encontrados por SANTOS et al. (2003) quando avaliaram zonas potenciais de manejo utilizando padrões de solo-planta-clima. A dimensão, a quantidade de amostras, o coeficiente de variação e a média de produtividade são apresentados na Tabela 10, de acordo com cada zona delimitada.

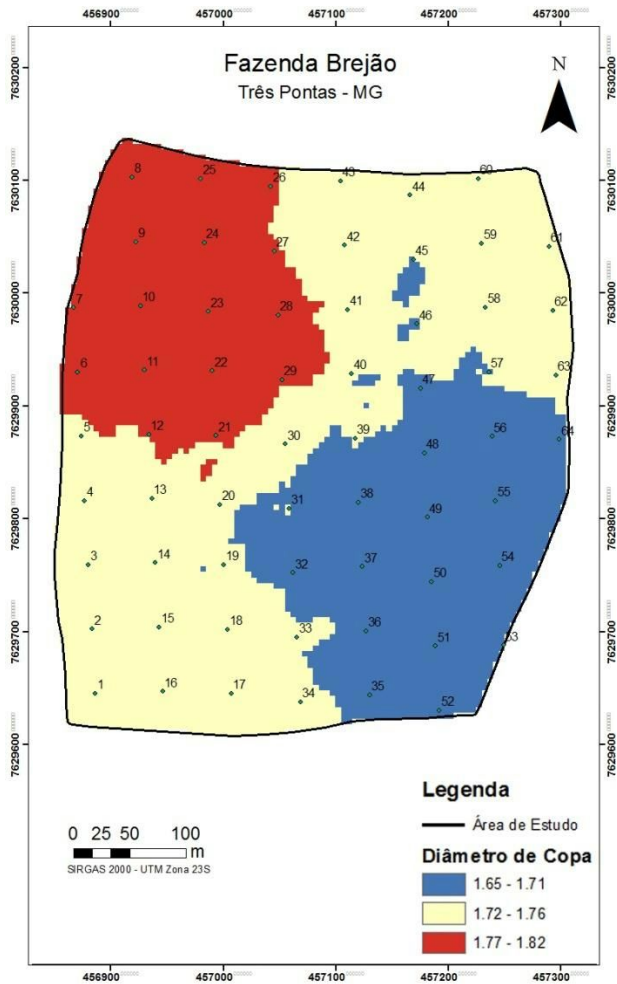
Tabela 10. Análise dos mapas de zonas de manejo delineadas com base na variável altitude.

	Zonas	Amostras	Área (ha)	C.V.	Média de produtividade (litros.planta⁻¹)
Duas	Baixa	20	5,30	Alto (23%)	5,14
	Alta	44	15,90	Muito alto (35%)	3,86
Três	Baixa	6	1,84	Alto (24%)	5,22
	Média	29	9,34	Alto (26%)	4,81
	Alta	29	10,00	Muito alto (36%)	3,52
Quatro	Baixa	5	1,00	Moderado (12%)	5,66
	Média Baixa	15	4,30	Alto (26%)	4,97
	Média Alta	20	8,50	Alto (28%)	4,35
	Alta	24	7,40	Muito alto (38%)	3,46



(b)

(c)



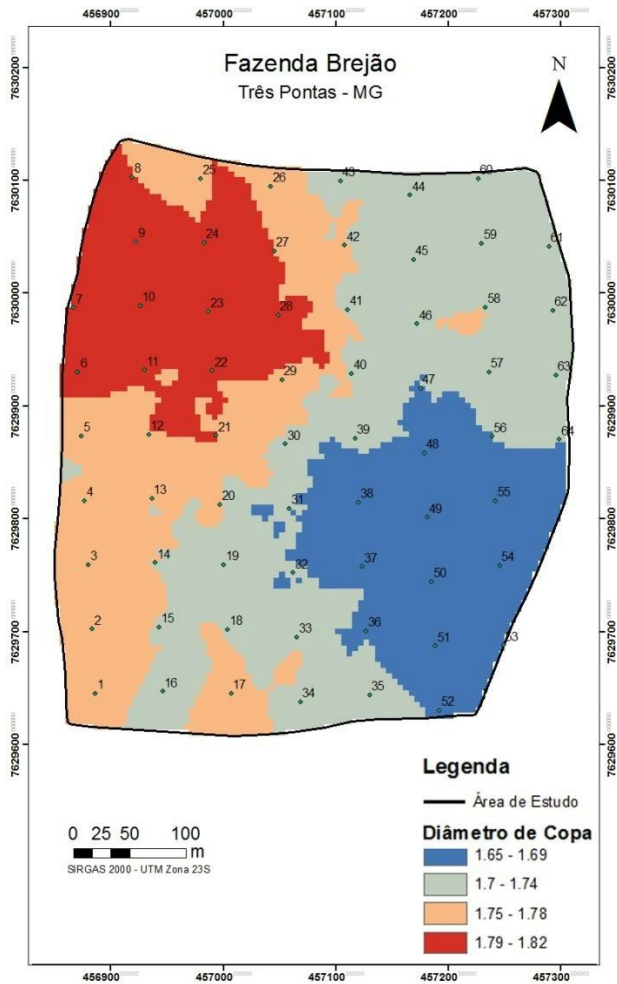
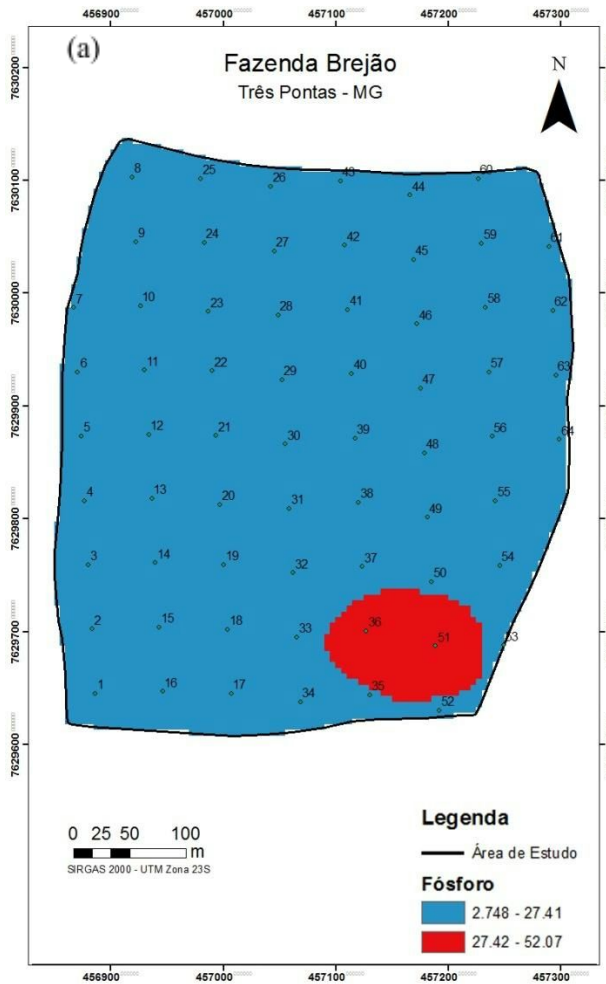


Figura 4. Zonas de manejo segundo a variável diâmetro de copa: (a) duas zonas, (b) três zonas e (c) quatro zonas.

Nas zonas de manejo geradas pela variável diâmetro de copa, observou-se que apesar dos grupos serem bem delineados nos mapas gerados para duas, três e quatro zonas, é possível identificar a confusão de sub-parcelas entre zonas para todos os casos. Apesar da variável diâmetro de copa, quando analisada por meio da geoestatística (Tabela 4) apresentar dependência espacial forte, essa confusão de sub-parcelas entre zonas sugere que atributos de planta, mesmo que muito próximos, podem ser muito diferentes em valores. A dimensão, a quantidade de amostras, o coeficiente de variação e a média de produtividade são apresentados na Tabela 11, de acordo com cada zona delimitada.

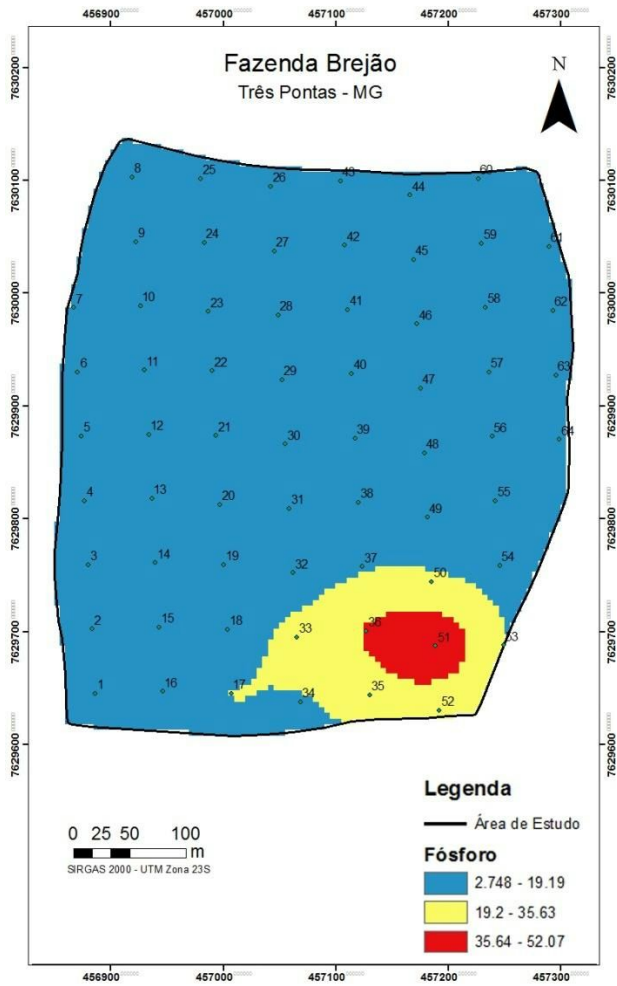
Tabela 11. Análise dos mapas de zonas de manejo delineadas com base na variável diâmetro de copa.

	Zonas	Amostras	Área (ha)	C.V.	Média de produtividade (litros.planta ⁻¹)
Duas	Baixa	39	12,20	Muito alto (37%)	4,00
	Alta	25	9,00	Alto (27%)	4,68
Três	Baixa	17	6,20	Muito alto (46%)	3,71
	Média	31	10,20	Alto (27%)	4,31
	Alta	16	4,80	Alto (30%)	4,76
Quatro	Baixa	13	4,50	Muito alto (50%)	3,79
	Média Baixa	26	7,80	Alto (29%)	4,09
	Média Alta	11	5,40	Alto (25%)	4,84
	Alta	14	3,60	Alto (30%)	4,58



(b)

(c)



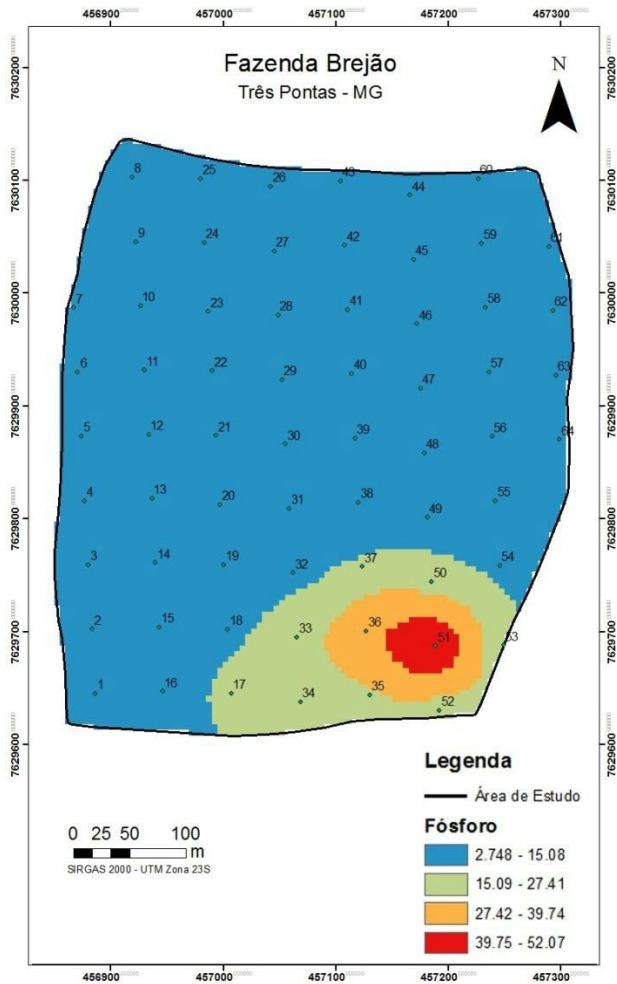


Figura 5. Zonas de manejo segundo a variável fósforo: (a) duas zonas, (b) três zonas e (c) quatro zonas.

Nas zonas de manejo geradas pela variável fósforo, observou-se bom delineamento para todos os casos, contudo é possível identificar que as zonas de maiores valores da variável se concentram em uma pequena região a sudeste da área de estudo. A dimensão, a quantidade de amostras, o coeficiente de variação e a média de produtividade são apresentados na Tabela 12, de acordo com cada zona delimitada.

Tabela 12. Análise dos mapas de zonas de manejo delineadas com base na variável fósforo (P).

	Zonas	Amostras	Área (ha)	C.V.	Média de produtividade (litros.planta ⁻¹)
Duas	Baixa	62	20,10	Muito alto (32%)	4,33
	Alta	2	1,10	Muito baixo (8%)	2,35
Três	Baixa	58	18,90	Muito alto (31%)	4,41
	Média	4	1,80	Muito alto (51%)	3,13
	Alta	2	0,50	Muito baixo (8%)	2,35
Quatro	Baixa	55	18,00	Alto (30%)	4,48
	Média Baixa	7	2,10	Muito alto (40%)	3,12
	Média Alta	1	0,80	-	2,48
	Alta	1	0,25	-	2,23

Recomenda-se a utilização dos mapas de duas e três zonas de manejo, baseados em valores de altitude, uma vez que esta variável está correlacionada com as variáveis pH, Ca, Al, SB, V, m e Prem. MOLIN & CASTRO (2008) ao delinear zonas de manejo utilizando condutividade elétrica e atributos químicos do solo, entenderam que mapas gerados com até três zonas de manejo apresentaram uma quantidade razoável de regiões para aplicações práticas.

De acordo com RONQUIM (2010) o pH fornece indícios sobre as condições químicas de um solo, que quando apresenta baixos valores (acidez elevada) geralmente apresenta pobreza em bases, elevado teor em alumínio e deficiência em alguns micronutrientes. Os macronutrientes Ca e Al são constituintes dos minerais e da matéria orgânica do substrato onde a planta se desenvolve e também se encontram dissolvidos na própria solução do solo. A soma de bases (SB) se apresenta como um indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. A saturação por bases (V) é capaz de indicar a quantidade de cátions como Ca, Mg, K e identificar se o solo está ácido a um nível prejudicial à cultura. O cálculo da saturação por Al (m) é considerada a forma mais correta de se avaliar a toxidez por alumínio no solo. Segundo RAMPIM et al. (2013) o fósforo remanescente (Prem) permite definir a dose de P e/ou S necessária para determinações físico-químicas.

Haja vista que todas as variáveis correlacionadas com a altitude e com a produtividade estão diretamente ligadas à fertilidade e quantidade de nutrientes no solo, os mapas recomendados para uso oferecem ao produtor uma ferramenta capaz de diminuir a quantidade de amostras para análises futuras, uma vez que ali se encontram sub-regiões com características homogêneas em seus atributos. Vale ressaltar que delinear zonas de manejo é uma ação dinâmica e pode ser influenciada pelo manejo anual do café e pelas variáveis adotadas em sua definição.

6 CONCLUSÕES

A integração metodológica adotada para definir zonas de manejo mostrou-se adequada para o reconhecimento de padrões de agrupamento nas variáveis que estiveram correlacionadas com a produtividade.

Foi possível verificar a correlação dos atributos do solo e planta com a produtividade e selecionar aqueles que se mostraram propícios a definição de zonas de manejo na cultura do cafeeiro.

Foi possível verificar a dependência espacial das variáveis altitude, diâmetro de copa e fósforo (P), candidatas a geração de zonas de manejo.

Foi possível definir zonas de manejo com as variáveis que mais se correlacionaram com a produtividade e observar a correlação das médias de produtividade nestas zonas criadas de acordo com as variáveis altitude, diâmetro de copa e fósforo (P).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. A. et al. Cafeicultura de precisão. In: **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 234.

ALVES, M. C. et al. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. **Precision Agriculture**, v. 12, p. 18–31, 2011.

BALASTREIRE, L. A. et al. **Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade de uma cultura de café**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. Anais...Foz do Iguaçu, PR, BR: Jaboticabal: SBEA, 2001. 1 CD-ROM, 2001.

BAZZI, C. L. **SOFTWARE PARA DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**. Cascavel: UNIOESTE, 2011, 123p. Tese Doutorado.

BAZZI, C. L. et al. Management zones definition using soil chemical and physical attributes in a soybean area. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 952–964, 2013.

BAZZI, C. L. et al. Zonas de manejo aplicadas à cultura do milho. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 87–99, 2015.

BLACKMORE, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, n. 200, p. 37–51, 2000.

BOLDINI, J. M. **Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado**. 67p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501, 1994.

CARR, P. M. et al. Farming fields, not soils: A strategy for increasing fertilizer profitability. **Journal of Production Agriculture**, v. 4, p. 57–61, 1991.

CARVALHO, L. G. et al. Modelo de regressão para a previsão de produtividade de cafeeiros no Estado Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 204–211, 2004.

CARVALHO, G. R. et al. Eficiência do Ethephon na uniformização e antecipação da maturação de frutos de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e na qualidade da bebida. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, p. 98–106, 2003.

CARVALHO, G. R. et al. Avaliação de produtividade de progênies de cafeeiro em dois sistemas de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 838–843, 2006.

CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265–275, 2013.

CASTRIGNANÒ, A. et al. Estimating within-field variation using a nonparametric density algorithm. **Environmetrics**, v. 17, p. 465–481, 2006.

CHALFOUN, S. M. et al. **Relação entre diferentes níveis de infecção de ferrugem (Hemileia vastatrix Berk. & Br.) e produção dos cafeeiros (Coffea arabica L.) em algumas localidades de Minas Gerais**. CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 6., 1978, Ribeirão Preto. Anais...Ribeirão Preto, SP, BR: 1978.

CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana de açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1013–1021, 2004.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: Wiley, 1993.

DERCON, G. et al. Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. **Soil and Tillage Research**, v. 86, p. 15–26, 2006.

DIACONO, M. et al. A combined approach of geostatistics and geographical clustering for delineating homogeneous zones in a durum wheat field in organic farming. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 64-65, p. 47–57, 2013.

DIKER, K.; HEERMANN, D. F.; BRODAHL, M. K. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 1999, p. 435–444, 2004.

DOERGE, T. Defining management zones for precision farming. **Crop Insights**, v. 21, n. 8, p. 1–5, 1999.

FERRAZ, G. A. S. et al. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 906–915, 2011.

FERRAZ, G. A. S. et al. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 140–150, 2012a.

FERRAZ, G. A. S. et al. Precision agriculture to study soil chemical properties and the yield of a coffee field. **Coffee Science**, v. 7, n. 1, p. 59–67, 2012b.

FERRAZ, G. A. S. et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, v. 13, p. 76–89, 2012c.

FLEMING, K. L. et al. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. **Precision Agriculture**, v. 2, p. 201–215, 2000.

- FLOWERS, M. et al. Yield-based management zones and grid sampling strategies: Describing soil test and nutrient variability. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 968–982, 2005.
- FONSECA, A. S. et al. Spatial variability of the productivity and the nutritional condition of coffee canephora. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 420–428, 2015.
- FRAISSE, C. W. et al. Delineation of Site-Specific Management Zones By Unsupervised Classification of Topographic Attributes and Soil Electrical Conductivity. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 44, n. 1, p. 155–166, 2001.
- FROGBROOK, Z. L. et al. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 1–9, 2002.
- GEBBERS, R. & ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, p. 828–831, 2010.
- GOMES, F. & GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002. 305p.
- HURLEY, T. M. et al. Estimating the potential value of variable rate nitrogen applications: A comparison of spatial econometric and geostatistical models. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 30, n. 2, p. 231–249, 2005.
- JAYNES, D. B. et al. Cluster analysis of spatiotemporal corn yield patterns in an Iowa field. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 574–586, 2003.
- JAYNES, D. B. et al. Identifying potential soybean management zones from multi-year yield data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 309–327, 2005.
- JOHNSON, C. K. et al. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 303–315, 2003.
- KHOSLA, R. & ALLEY, M. M. Soil-Specific Nitrogen Management On Mid-Atlantic Coastal Plain Soils. **Better Crops**, v. 83, p. 6–7, 1999.
- LARK, R. M. Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems. **Soil and Tillage Research**, v. 58, p. 99–111, 2001.
- LARSON, W. E. & ROBERT, P. C. **Farming by soil**. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. (Eds.). . Soil management for sustainability. Ankeny, IA, USA: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 103–112.
- LI, Y. et al. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. **Journal of Zhejiang University. Science. B**, v. 9, p. 68–76, 2008.

LIMA, J. S. D. S. et al. Spatial and temporal variability of the productivity of coffee canephora. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 400–407, 2014.

LIMA, J. S. D. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 16–23, 2013.

MANZIONE, R. L. et al. **Análise espacial multivariada na avaliação de parâmetros químicos do solo**. In: BALASTREIRE, L. A. (Ed.). . Avanços na Agricultura de Precisão no Brasil no período de 1999-2001. Piracicaba, SP, BR: [s.n.].

MAPA, R. B. & KUMARAGAMAGE, D. Variability of soil properties in a tropical Alfisol used for shifting cultivation. **Soil Technology**, v. 9, n. 3, p. 187–197, 1996.

MARQUES JUNIOR, J. et al. **Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob cultivo de café, em Patrocínio, MG**. In: BALASTREIRE, L. A. (Ed.). . O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil. Piracicaba, SP, BR: ESALQ, 2000. p. 105–112.

MIQUELONI, D. P. et al. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 18–28, 2015.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, SP, BR: ESALQ, 2001.

MOLIN, J. P. et al. **Precision agriculture for coffee in Brazil**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2002, Minneapolis. Anais...Minneapolis, MN, USA: ASA/CSSA/SSSA, 2002

MOLIN, J. P. et al. **Taxa variada de P e K em um cafezal e sua influência na produtividade**. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 4., 2006, Piracicaba. Anais...Piracicaba, SP, BR: USP/ESALQ, 2006

MOLIN, J. P. et al. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1992, p. 569–575, 2010.

MOLIN, J. P. & CASTRO, C. N. Establishing Management Zones Using Soil Electrical Conductivity And Other Soil Properties By The Fuzzy Clustering Technique. **Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**, v. 65, n. 6, p. 567–573, 2008.

MORARI, F. et al. 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.

MULLA, D. J. **Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield.** In: ROBERT, P.; LARSON, W.; RUST, R. (Eds.). . Soil specific crop management. Madison, WI, USA: ASA, 1993. p. 15–26.

MULLA, D. J. **Geostatistics, remote sensing and precision farming.** In: Precision Agriculture: Spatial and Temporal Variability of Environmental Quality. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd., 1997. p. 260.

MULLA, D. J. et al. **Modeling the effect of precision agriculture: pesticide losses to surface waters.** In: ARTHUR, E.; BAREFOOT, A.; CLAY, V. (Eds.). . Terrestrial field dissipation studies. Washington, DC, USA: ACS, 2002. p. 304–317.

MULLA, D. J. et al. A site-specific farm-scale GIS approach for reducing groundwater contamination by pesticides. **Journal of Environmental Quality**, v. 25, p. 419–425, 1996.

MZUKU, M. et al. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1572, 2005.

NOLAN, S. C. et al. **Assessing management units on rolling topography.** In: ROBERT, P. C.; RUST, R. . H.; LARSON, W. E. (Eds.). . Proceedings of the Fifth International Conference on Precision and Other Resource Management. Madison, WI, USA: ASA/CSSA/SSSA, 2000.

OLIVEIRA, R. B. et al. Spatial variability of the nutritional condition of canephora coffee aiming specific management. **Coffee Science**, v. 5, n. 3, p. 190–196, 2010.

OLIVEIRA FILHO, F. X. et al. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 186–193, 2015.

OLIVEIRA, R. B. **Mapeamento e correlação de atributos do solo e de plantas de café conilon para fins de agricultura de precisão.** (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

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

PARK, W. et al. Classification As A First Step In The Interpretation Of Temporal And Spatial Variation Of Crop Yield. **Annals of Applied Biology**, v. 130, p. 111–121, 1997.

QUEIROZ, D. M. et al. **Agricultura de precisão na produção de grãos.** In: BORÉM, A. et al. (Eds.). . Agricultura de Precisão. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 1–41.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing.** Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 24 fev. 2015.

RAMPIM, L. et al. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em latossolo vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1623–1638, 2013.

RENA, A. B. et al. **Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados** (P. . CARAMORI et al., Eds.) SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1994, Londrina. Anais...Londrina, PR, BR: IAPAR, 1996

REYNIERS, M. et al. Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. **Soil and Tillage Research**, v. 88, p. 262–273, 2006.

RIBEIRO JR., P. J. & DIGGLE, P. J. geoR: A package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, n. June, p. 15–18, 2001.

RODRIGUES JUNIOR, F. A. et al. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 31, p. 778–787, 2011.

RONQUIM, C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Campinas: Embrapa, 2010. 26p.

SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 1095–1103, 2009.

SANTOS, A. O. et al. Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 463–468, 2003.

SANTOS, E. O. J. et al. Spatial variability of soil acidity attributes and liming requirement for conilon coffee. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 275–283, 2014.

SCHEPERS, A. R. et al. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 195–203, 2005.

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially-Variable Control of crop production. **Fertilizer Research**, v. 33, p. 1–34, 1992.

SHAPIRO, S. S. & WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3, p. 591–611, 1965.

SILVA, A. F. et al. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO CULTIVADO COM CAFÉ ARÁBICA (*Coffea arabica* L.) SOB DIFERENTES MANEJOS. **Coffee Science**, v. 5, n. 2, p. 173–182, 2010.

SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, v. 37, p. 401–407, 2007.

SILVA, F. C. Efeito da força de desprendimento e maturação dos frutos de cafeeiros na colheita mecanizada. Lavras: UFLA, 2008. 106p. Dissertação Mestrado.

SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 1, p. 231–241, 2008.

SILVA, S. A. & LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 467–474, 2012.

SILVA, S. A. & LIMA, J. S. S. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA RELAÇÃO ESPACIAL COM A PRODUTIVIDADE DO CAFÉ ARÁBICA. **Coffee Science**, v. 8, n. 4, p. 395–403, 2013.

SILVA, S. A. et al. DE. Estudo da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico sob cultivo de café arábica por meio de geoestatística. **Revista Ceres**, v. 57, p. 560–567, 2010.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 491–499, 2004.

STAFFORD, J. V. et al. **Using yield maps to regionalize fields into potential management units**. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. (Eds.). . Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture. St. Paul, MN, July 19–22, 1998. Madison, WI, USA: ASA, CSSA, SSSA, 1999. p. 225–237.

TIAN, L. Development of a sensor-based precision herbicide application system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, p. 133–149, 2002.

TOLEDO, S. V. & BARROS, I. DE. Influência da densidade de plantio e sistema de podas na produção de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 8, p. 1379–1384, 1999.

TRANGMAR, B. B. et al. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 45–94, 1985.

VALENCIA, L. I. O. et al. **Geoestatística aplicada à agricultura de precisão**. In: MACHADO, P. L. O. DE A.; BERNARDI, A. C. DE C.; SILVA, C. A. (Eds.). . Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. Rio de Janeiro, RJ, BR: Embrapa Solos, 2004. p. 37–56.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade especial do solo**. In: NOVAIS, R. F. DE; ALVAREZ, V. H.; SHAEFER, C. R. G. R. (Eds.). . Tópicos em ciência do Solo. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1–54.

VRINDTS, E. et al. Analysis of soil and crop properties for precision agriculture for winter wheat. **Biosystems Engineering**, v. 85, p. 141–152, 2003.

VRINDTS, E. et al. Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. **Biosystems Engineering**, v. 92, p. 419–428, 2005.

WEBSTER, R. & OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

ZHANG, N. et al. Precision agriculture - a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, p. 113–132, 2002.

ZIMMERMANN, F. J. P. Estatística aplicada à pesquisa agrícola. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

ZONTA, J. H. et al. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil TT - Spatial variability of soil fertility in cultivated area of cotton in Brazilian Savannah. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2005, p. 595–602, 2014.