

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

Anna Carolina Barboza Souza

**Sensoriamento remoto e condutividade elétrica
aparente para o delineamento de zonas de manejo
na cultura do café arábica**

Alegre - ES

2022

Anna Carolina Barboza Souza

**Sensoriamento remoto e condutividade elétrica
aparente para o delineamento de zonas de manejo
na cultura do café arábica**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador:

Prof. Dr. Samuel de Assis Silva

Coorientador:

Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima

Prof. Dr. Gustavo Soares de Souza

Alegre – ES

2022

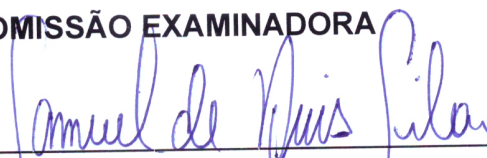
Sensoriamento remoto e condutividade elétrica aparente para o delineamento de zonas de manejo na cultura do café arábica

Anna Carolina Barbosa Souza

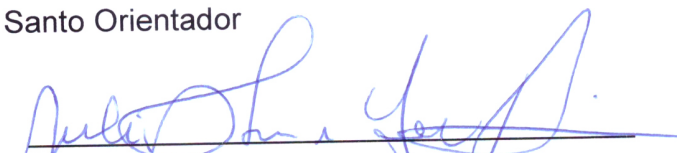
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestra em Agronomia.

Aprovada em 22 de dezembro de 2022

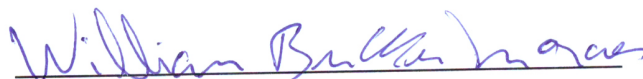
COMISSÃO EXAMINADORA



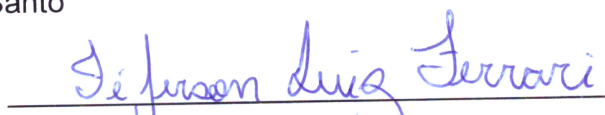
Prof. Dr. Samuel de Assis Silva
Universidade Federal do Espírito
Santo Orientador



Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima
Universidade Federal do Espírito
Santo Coorientador



Prof. Dr. Willian Bucker Moraes
Universidade Federal do Espírito
Santo



Prof. Dr. Jeferson Luiz Ferrari
Instituto Federal do Espírito Santo

À minha mãe, Patrícia Rodrigues Barboza, e aos meus avós Irsénis Rodrigues Barboza (*In memorian*) e Vergílio Ataíde Barboza

Dedico.

Agradecimentos

A Deus Pai, Santo, Querido e Amado, a quem eu entreguei o meu espírito, pelo dom da vida e que em sua infinita bondade, ter permitido que eu concluísse mais uma etapa da minha jornada.

À minha família, especialmente à minha mãe Patrícia, e meus queridos avós maternos, por sempre terem sido meu sustento e não terem medido esforços para que eu realizasse os meus sonhos, que também são os sonhos deles. Ao Junior, que me acompanha aonde quer que eu vá, e que esteve comigo em todos os dias de coleta de dados a campo.

Ao professor Samuel de Assis, por ter mais uma vez confiado no meu trabalho, por ter feito papel de pai, conselheiro e amigo, incontáveis vezes.

Aos membros da banca, Jéferson Ferrari, Julião Soares e Wiliam Bucker por aceitarem o convite e contribuírem em minha formação acadêmica e profissional.

Ao Rondinelli Lima, por todo apoio e carinho comigo.

Aos antigos amigos de faculdade, Carla Cristina, Édipo Monte, Catariny Nicoli, Géssica Bigli e Jussara Gervásio, que mesmo distantes ainda se fazem presentes.

Aos novos amigos do mestrado, especialmente ao Vinicius Souza, Rodrigo Dias e Mário Areas.

Aos colegas de trabalho do Instituto Federal do Espírito Santo campus de Alegre, pela parceria e compreensão, especialmente à Anna Clara Torres, Luciano Menini, Rosemeri Torres, Cláudio Paschoa, Janio Gloria e Janderson Coswosk.

Aos proprietários do sítio Córrego Estevão – Antônio, Maria José Riva e Antônio José Riva por toda contribuição, paciência e atenção ao longo das safras em que esse trabalho foi conduzido.

À Universidade Federal do Espírito Santo, por toda estrutura cedida e demais profissionais que contribuíram em minha formação.

Muito obrigada.

“No entanto, ninguém é digno de contribuir para a ciência se não usar suas dores e insônias nesse processo. Não há céu sem tempestade. Risos e lágrimas, sucessos e fracassos, aplausos e vaias fazem parte do currículo de cada ser humano, em especial daqueles que são apaixonados por produzir novas ideias.”
(Augusto Cury)

RESUMO

O uso de técnicas de Agricultura de Precisão (AP) na cultura do café tem crescido nos últimos anos, visto que possibilita a utilização de ferramentas mais modernas que permitem que a produção agrícola seja otimizada. É interessante que a obtenção de informações acerca das áreas produtivas seja feita de forma mais rápida e menos onerosa, além disso é importante que o manejo dessas áreas seja realizado de modo a permitir melhor utilização dos recursos disponíveis. No caso da cafeicultura de montanha, ainda existe uma certa dificuldade em aplicar insumos a taxas variadas por conta da necessidade de mecanização das áreas, uma alternativa a isso pode ser a utilização de zonas de manejo (ZM) para gerenciar a área de produção conforme as reais necessidades de cada local de forma mais precisa. Por isso é importante que se executem trabalhos que avaliem a possibilidade de aplicação de ferramentas de AP na cafeicultura de montanha, permitindo que o produto final obtido tenha maior produtividade e qualidade. Nesse sentido, o trabalho foi desenvolvido com o objetivo de delinear ZM para a cultura do café arábica, por meio de índices de vegetação e condutividade elétrica aparente do solo. O estudo foi realizado em uma lavoura de café arábica, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62 com oito anos de idade, no município de Alegre - ES. Uma malha amostral irregular foi montada totalizando 80 pontos georreferenciados. Obedecendo a malha utilizada, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-0,20 m das quais foram realizadas análises químicas e físicas. Na mesma profundidade foi analisada a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) em três momentos diferentes. Além dessas análises também foram avaliados os índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), MPRI (Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado) e NDRE (Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge) e a produtividade obtida em cada uma das duas safras de estudo. Na primeira safra as combinações das variáveis obtidas foram utilizadas no delineamento da ZM a ser seguida como base no segundo ano de estudo. Com a ZM delimitada foi avaliada a produtividade e qualidade da bebida. Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas clássicas e geoestatística. Em relação às variáveis que determinam a produtividade da lavoura cafeeira, observa-se que elas seguem um padrão de regionalização que deve ser levado em conta para a recomendação do manejo. Os índices de vegetação na fase de granação dos frutos estão relacionados com a produtividade da lavoura, mas visando o delineamento de

ZM, bastam os resultados de CEa combinados com os dados de altitude e argila, não justificando o uso dos índices uma vez que tornam o processo mais caro e trabalhoso. Além disso, os resultados indicam que na segunda safra houve significativa diminuição de grande parte dos teores de nutrientes do solo, o que pode ter ocorrido devido à extração em um ano de alta produção. Outro fator que pode influenciar tanto na disponibilidade de nutrientes quanto na produtividade da lavoura é adubação realizada em quantidades inferiores ao recomendado. Quanto à qualidade da bebida, nota-se que todos os lotes avaliados apresentaram cafés com potencial para produzir bebida de qualidade, além de ter mantido um padrão de qualidade em ambas as safras de estudo, o que permite ao produtor apostar no mercado de cafés especiais.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; Agricultura de Precisão; Cafeicultura de montanha; Geoestatística; Cafés de qualidade.

ABSTRACT

The use of Precision Agriculture (PA) techniques in coffee cultivation has grown in recent years, as it enables the use of more modern tools that allow agricultural production to be optimized. It is interesting that obtaining information about the productive areas is done faster and less costly. In addition to that it is important that the management of these areas is carried out in a way that allows better use of the available resources. In the case of mountain coffee growing, there is still some difficulty in applying inputs at varying rates due to the need for mechanization of the areas, an alternative to this may be the use of management zones (MZ) to manage the production area according to the real needs of each location more precisely. That is why it is important to carry out studies that evaluate the possibility of applying PA tools in mountain coffee growing, allowing the final product to have greater productivity and quality. In this sense, this work was developed with the objective of delineating MZ for the culture of Arabica coffee, through vegetation indices and apparent soil electrical conductivity. The study was carried out in an eight-year-old Arabica coffee crop, variety Catuaí Amarelo, in the municipality of Alegre - ES. An irregular sampling mesh was assembled, totaling 80 georeferenced points. Obeying the mesh used, soil samples were collected at a depth of 0-0.20 m, from which chemical and physical analyzes were carried out. At the same depth, the apparent soil electrical conductivity (ECa) was analyzed at three different times. In addition to these analyses, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), MPRI (Modified Photochemical Reflectance Index) and NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) vegetation indices and the productivity obtained in each of the two study seasons were also evaluated. In the first season, the combinations of the variables obtained were used in the design of the MZ to be followed as a basis for the second year of the study. With the MZ outlined, the productivity and quality of the drink were evaluated. The data obtained were submitted to classic statistical and geostatistical analyses. Regarding the variables that determine the productivity of the coffee crop, it is observed that they follow a pattern of regionalization that must be taken into account for the management recommendation. Vegetation indices in the fruiting stage are related to crop productivity, but with a view to designing the MZ, the ECa results combined with altitude and clay data are sufficient, not justifying the use of indices since they make the more expensive and laborious process. In addition, the results indicate that in the

second harvest there was a significant decrease in most of the soil nutrient content, which may have occurred due to extraction in a year of high production. Another factor that can influence both the availability of nutrients and the productivity of the crop is fertilization carried out in amounts lower than recommended. As for the quality of the drink, it can be seen that all evaluated batches presented coffees with the potential to produce a quality drink, in addition to having maintained a quality standard in both harvests studied, which allows the producer to bet on the special coffee Market.

Keywords: *Coffea Arabica* L.; Precision Agriculture; Mountain coffee growing; Geostatistics; Quality coffees.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 1: Localização da área de estudo	26
Figura 2: Altitude e malha amostral na área de estudo	27
Figura 3: Método de medida de resistividade elétrica com o arranjo de quatro eletrodos. Eletrodos de corrente C1 e C2; Eletrodos de potencial P1 e P2; a espaçamento entre os eletrodos. Fonte: Adaptado de Corwin e Lesch (2003)	28
Figura 4: Distribuição espacial da altitude em lavoura cafeeira	40
Figura 5: Distribuição espacial de atributos de solo em uma lavoura cafeeira. (a) Argila; (b) Teor de fósforo; (c) Teor de potássio; (d) Teor de Cálcio; (e) Teor de magnésio; (f) Teor de sódio; (g) Teor de alumínio; (h) pH do solo; (i) Acidez potencial; (j) Soma de Bases; (k) CTC potencial (t); (l) CTC a pH 7,0 (T); (m) Saturação de bases; (n) Saturação por alumínio	40
Figura 6: Distribuição espacial de índices de vegetação em uma lavoura cafeeira. (a) NDVI ₁ ; (b) NDVI ₂ ; (c) NDRE ₁ ; (d) NDRE ₂ ; (e) MPRI ₁ e (f) MPRI ₂	43
Figura 7: Distribuição espacial de condutividade elétrica aparente em lavoura cultivada com café arábica. (a) CEa ₁ ; (b) CEa ₂ e (c) CEa ₃	45
Figura 8: Distribuição espacial da produtividade em lavoura cultivada com café arábica	45

CAPÍTULO III

Figura 1: Cobertura do local de estudo	56
Figura 2: Altitude e malha amostral na área de estudo	57
Figura 3: Método de medida de resistividade elétrica com o arranjo de quatro eletrodos. Eletrodos de corrente C1 e C2; Eletrodos de potencial P1 e P2; a espaçamento entre os eletrodos. Fonte: Adaptado de Corwin e Lesch (2003).....	58
Figura 4: Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de (a) Arg, (b) CEa, (c) Alt_Arg_CEA, (d) Alt_Arg_CEA_NDVI e (e) Alt_Arg_CEA_MPRI em duas classes.....	65

Figura 5: Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de (a) Alt_Arg_NDVI e (b) Alt_Arg_NDRE em três classes	66
Figura 6: Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de Alt_Arg_MPRI em quatro classes	67
Figura 7: Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de NDRE em cinco classes	67

CAPÍTULO IV

Figura 1: Localização geográfica da área de estudo	78
Figura 2: Esquematização da divisão da área estudada em zonas de manejo (a) e em talhões (b). ZM1 – Classe 1; ZM2 – Classe 2; T1 – Talhão 1; T2 – Talhão 2; T3 – Talhão 3	79
Figura 3: Distribuição espacial do CDRi em uma lavoura cafeeira. (a) Fósforo; (b) Cálcio; (c) Magnésio; (d) pH do solo; (e) Acidez potencial; (f) Soma de Bases; (g) CTC potencial (t); (h) CTC a pH 7,0 (T); (i) Saturação por bases; (j) Matéria orgânica; (k) Fósforo Remanescente	86
Figura 4: Produtividade em kg ha ⁻¹ nos diferentes talhões e zonas de manejo nas duas safras de estudo. T01S1 – Talhão 01 Safra 20/21; T02S1 – Talhão 02 Safra 20/21; T03S1 – Talhão 03 Safra 20/21; T01S2 – Talhão 01 Safra 21/22; T02S2 – Talhão 02 Safra 21/22; T03S2 – Talhão 03 Safra 21/22; ZM01 – Zona de manejo 01 Safra 21/22 e ZM02 - Zona de manejo 02 Safra 21/22	89
Figura 5: Qualidade global da bebida nas diferentes estratificações nas duas safras de estudo. T01S1 – Talhão 01 Safra 20/21; T02S1 – Talhão 02 Safra 20/21; T03S1 – Talhão 03 Safra 20/21; T01S2 – Talhão 01 Safra 21/22; T02S2 – Talhão 02 Safra 21/22; T03S2 – Talhão 03 Safra 21/22; ZM01 – Zona de manejo 01 Safra 21/22 e ZM02 - Zona de manejo 02 Safra 21/22	91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1: Valores médios de CEa e teor de água no solo em diferentes momentos de medição	33
Tabela 2: Estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos de solo e planta do cafeeiro	34
Tabela 3: Modelos e parâmetros dos variogramas médios escalonados ajustados aos atributos de solo e planta do cafeeiro	38
Tabela 4: Relatório de correlação entre mapas de atributos de solo e planta e condutividade elétrica aparente do solo	46
Tabela 5: Relatório de correlação entre mapas índices de vegetação e produtividade.....	47

CAPÍTULO III

Tabela 1: Atributos a serem avaliados nas combinações de zonas de manejo.....	61
Tabela 2: Modelos e parâmetros dos variogramas médios escalonados ajustados aos atributos de solo e planta do cafeeiro.....	63
Tabela 3: Índice FPI e MPE para cada classe de cada zona de manejo	63
Tabela 4: Coeficiente Kappa para as classificações das propriedades do solo com as zonas de manejo em duas classes	68

CAPÍTULO IV

Tabela 1: Chave da SCAA para a classificação sensorial de cafés especiais.....	81
Tabela 2: Estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos de solo do cafeeiro em dois momentos	83
Tabela 3: Modelos e parâmetros dos variogramas escalonados ajustados aos atributos de solo do cafeeiro em dois momentos	85

SUMÁRIO

CAPÍTULO I Sensoriamento remoto e condutividade elétrica aparente para o delineamento de zonas de manejo na cultura do café arábica	15
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	15
1.2 HIPÓTESES	18
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 OBJETIVO GERAL	18
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO	19
1.5 REFERÊNCIAS	20
CAPÍTULO II Sensoriamento remoto na avaliação de atributos de solo e planta em lavoura de café arábica	23
2.1 INTRODUÇÃO	25
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	26
2.2.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	26
2.2.2 MALHA AMOSTRAL, AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE SOLO	27
2.2.3 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO E DETERMINAÇÃO DE UMIDADE	28
2.2.4 AEROLEVANTAMENTO E CÁLCULO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	29
2.2.5 DETERMINAÇÃO DE PRODUTIVIDADE	31
2.2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E GEOESTATÍSTICAS	32
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
2.4 CONCLUSÕES	48
2.5 REFERÊNCIAS	48
CAPÍTULO III Delineamento de zonas de manejo em lavoura de café com base em atributos do solo e condutividade elétrica aparente	53

3.1	INTRODUÇÃO	55
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	55
3.2.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO E DEFINIÇÃO DA MALHA AMOSTRAL.....	55
3.2.2	COLETA DE SOLO PARA ANÁLISE	57
3.2.3	LEITURA DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	57
3.2.4	REALIZAÇÃO DE AEROLEVANTAMENTOS	59
3.2.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS E GEOESTATÍSTICAS.....	60
3.2.6	DEFINIÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO	61
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
3.4	CONCLUSÕES	70
3.5	REFERÊNCIAS	71
CAPÍTULO IV Determinação da qualidade e produtividade do café arábica conduzido em zonas de manejo		75
4.1	INTRODUÇÃO	77
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	78
4.2.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	78
4.2.2	AMOSTRAGEM DO SOLO	79
4.2.3	COLETA E BENEFICIAMENTO DOS FRUTOS	80
4.2.4	DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE	80
4.2.5	DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DA BEBIDA.....	81
4.2.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS E GEOESTATÍSTICAS.....	82
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.4	CONCLUSÕES	92
4.5	REFERÊNCIAS	92
CAPÍTULO V Conclusão geral		95

CAPÍTULO I

Sensoriamento remoto e condutividade elétrica aparente para o delineamento de zonas de manejo na cultura do café arábica

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

O café é uma planta pertencente ao gênero *Coffea*, que abrange mais de 100 espécies. Na produção da bebida do café podem ser utilizadas três dessas espécies: *Coffea arábica* L., *Coffea canephora* Pierre ex Froehner e *Coffea ibérica* Bull ex Hiern. Dessas três *C. canephora* (café robusta) e *C. arábica* (café arábica) são as mais produzidas, sendo a última a de maior destaque comercial (DAVIS *et al.*, 2006).

A cafeicultura apresenta-se como uma das principais atividades agrícolas do Brasil, por conta da aptidão para produção da cultura e avanços nas técnicas de manejo, sendo o país o maior produtor e exportador de café do mundo. Na safra de 2019/2020 a produção brasileira atingiu 69 milhões de sacas, o que representa cerca de 39% da produção mundial (ICO, 2020).

Diante da importância da cafeicultura, estudos visando o aumento da produtividade juntamente com a aplicação mais adequada de insumos, são cada vez mais demandados. Com o intuito de otimizar o manejo agrícola, o uso da Agricultura de Precisão e Digital é ainda mais frequente por conta da avaliação da variabilidade espacial das propriedades do solo, além de também oferecer informações sobre a condição de fertilidade (SILVA *et al.*, 2022). Entre as ferramentas utilizadas pela Agricultura de Precisão está o delineamento de zonas de manejo, locais considerados homogêneos com base em atributos e fatores de limitação e produção semelhantes (DOERGE, 1999; GAVIOLI *et al.*, 2019), que são geradas a partir da divisão dos campos de produção em áreas menores, onde pode ser feito o gerenciamento da cultura de forma mais adequada (FARID *et al.*, 2016).

Para que as zonas de manejo (ZM) sejam bem estabelecidas, é importante usar atributos com menor variabilidade temporal e de menor custo de

obtenção, garantindo que as divisões estabelecidas nos campos de produção sejam estáveis em safras sucessivas. Além desses fatores, as variáveis escolhidas também devem estar diretamente relacionadas com a produtividade da cultura. Nesse sentido, entre as variáveis que mais vêm sendo utilizadas estão os atributos físicos do solo, a produtividade da cultura (ALARCÓN-JIMÉNEZ; CAMACHO-TAMAYO; BERNAL, 2015; SILVA *et al.*, 2015), a condutividade elétrica aparente do solo (BOTTEGA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2021) e os índices vegetativos (KUIAWSKI *et al.*, 2017).

Diante do advento de novas tecnologias e com maior acesso a sensores, como o caso de medidores de condutividade elétrica aparente, grandes volumes de dados podem ser obtidos e processados de forma menos trabalhosa (HEDLEY, 2015). A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) responde a uma série de propriedades do solo, em especial, a concentração de sais e o teor de argila, e é uma das variáveis que podem ser estimadas, em escalas de tempo real, com sensores como os de contato direto e de indução eletromagnética (CHO; SUDDUTH; CHUNG, 2016). Embora a CEa ainda não seja usada para fazer estimativas generalizadas dos atributos do solo ou como substituta para a amostragem, é possível utilizá-la como instrumento para separar diferentes tipos de solos e definir zonas de manejo e essas, por sua vez, podem ser utilizadas para direcionar a amostragens a fim da aplicação de insumos a taxas variáveis (MEDEIROS *et al.*, 2018).

Além dos dados de CEa, técnicas para monitorar culturas e estudar o comportamento da vegetação por meio de índices vegetativos são também avanços da Agricultura de Precisão e Digital. No sensoriamento remoto, que é uma forma de fazer avaliações sem contato direto com o alvo estudado, são utilizadas principalmente imagens obtidas por meio de sensores. O sensoriamento remoto aéreo pode ser realizado com sensores embarcados em veículos aéreos tripulados ou não tripulados, a vantagem desse tipo de coleta de dados é principalmente a alta resolução das imagens (DASH *et al.*, 2017). Já o sensoriamento remoto orbital é realizado com imagens de satélites que geralmente quando gratuitas possuem menor resolução (YAN *et al.*, 2016).

A aquisição de imagens digitais permite o estudo da reflectância. Esses dados espectrais relacionados às características das culturas podem ser estudados como índices de vegetação (ABRAHÃO *et al.*, 2009). Entre os índices

estudados recentemente, pode-se citar o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), MPRI (Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado) e NDRE (Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge) que podem ser utilizados para diversos fins. Flores *et al.* (2020) avaliaram o desempenho agrônômico sob doses de adubação na cultura do milho e observaram que o NDVI tem maior relação com a altura da planta, já o NDRE apresentou associação com o teor de N nas folhas. Marin *et al.* (2021) utilizaram índices para identificação dos efeitos causados por intempéries climáticas em culturas agrícolas e percebeu-se que o melhor índice foi o NDVI em comparação ao NDRE. O NDVI também pode ser utilizado na discriminação de áreas infectadas por doenças como a ferrugem do café, auxiliando em medidas ainda no estágio inicial (KATSUHAMA *et al.*, 2018).

O aumento na utilização de índices de vegetação ocorre pela relação entre o estado de sanidade e nutricional dos cultivos com as características espectrais da cultura. Geralmente as plantas saudáveis refletem a maior parte dos comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e verde e absorvem os comprimentos de onda do vermelho (BOGUE, 2017). Por isso estudos recentes visam a exploração de informações coletadas por meio de imagens obtidas com sensores multiespectrais e hiperespectrais, ou até mesmo no espectro visível, infravermelho e RedEdge, banda que usa uma faixa espectral mais estreita entre o vermelho visível e o NIR (BERNI *et al.*, 2009; PRIMICERIO *et al.*, 2012).

Por conta da importância econômica e social da cafeicultura e ante a possibilidade de permitir que técnicas de Agricultura de Precisão e Digital sejam utilizadas na cultura, pretende-se com o presente trabalho propor um conjunto de práticas de manejos mais eficientes em substituição aos modelos convencionais. Os sensores de solo e planta a serem utilizados nessa pesquisa, como medidor de condutividade elétrica aparente do solo e câmera multiespectral, já são utilizados como ferramentas para monitoramento de áreas agrícolas e adotados no manejo de outras culturas, porém o uso na cafeicultura, especialmente a de montanha, ainda não é muito difundido.

O uso dos sensores de solo e de planta também auxilia na adoção de técnicas de Agricultura de Precisão por conta do alto custo de amostragens convencionais de solo além da dificuldade com a adubação ponto a ponto. Com

os sensores pretende-se um direcionamento para os locais amostrados de forma que a coleta de informações seja eficiente e representativa, mesmo com menos pontos. Sendo as ZM um método para adoção de manejos localizados em diversos cultivos agrícolas, esse trabalho pode contribuir com a aplicação de novas tecnologias de agricultura de precisão em pequenas áreas, trazendo benefícios para a cafeicultura de montanha na melhor aplicação dos insumos utilizados e melhorando a viabilidade técnico-econômica da cultura, e possibilitando a obtenção de cafés de melhor qualidade, a redução dos custos da mão-de-obra, e manutenção da sucessão familiar, reduzindo a saída dos trabalhadores para as cidades.

1.2 HIPÓTESES

- I. O sensoriamento remoto aéreo e a CEa são viáveis para a definição de zonas de manejo para a cultura do café arábica; e
- II. A adoção das zonas de manejo permite aumentar a eficiência dos manejos agrônômicos para a cultura do café arábica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Delinear e validar zonas de manejo para a cultura do café arábica, por meio de índices de vegetação e condutividade elétrica aparente do solo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar e quantificar a variabilidade espacial e a estabilidade temporal da CEa, atributos químicos e físicos do solo, índices de vegetação e produtividade do café arábica;
- Delinear zonas de manejo para a cultura do café arábica, testando a efetividade de diferentes variáveis de entrada;
- Avaliar o efeito dos manejos localizados sobre a variabilidade espaço-temporal da resposta espectral das plantas e a produtividade da cultura;
- Comparar diferentes índices de vegetação para a descrição da variação espaço-temporal do vigor vegetativo de cafeeiros arábica.

1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo um introdutório, três no formato de artigos científicos e um com as conclusões gerais da pesquisa. Os capítulos na forma de artigos científicos abordam as metodologias e os resultados obtidos em cada fase da pesquisa realizada ao longo de dois anos agrícolas – safra 2020/2021 e safra 2021/2022.

O primeiro capítulo é introdutório e pretende apresentar a ideia geral do trabalho. No segundo capítulo, que é um artigo científico, assim como o terceiro e o quarto, foram analisados os atributos químicos e físicos do solo, condutividade elétrica aparente e umidade do solo e os atributos de planta como os índices vegetativos NDVI, MPRI e NDRE por meio de sensoriamento remoto aéreo.

O terceiro capítulo compreende um segundo artigo onde foi abordado o delineamento de zonas de manejo na cultura do café, onde foram utilizados softwares estatísticos relacionando os atributos de solo e planta para a delimitação de zonas de manejo que foram adotadas na segunda safra de estudo.

O quarto capítulo abrange o terceiro e último artigo do trabalho, onde é apresentado um estudo sobre a determinação da qualidade e produtividade do café arábica conduzido nas zonas de manejo determinadas no ano agrícola anterior. O trabalho foi realizado com o objetivo de comparar a qualidade e a produtividade de uma lavoura cafeeira dividida em zonas de manejo em dois momentos. Por fim, o quinto capítulo mostra os principais resultados obtidos com essa pesquisa e as conclusões obtidas com este trabalho.

1.5 REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, S. A. *et al.* Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 9, 2009.
- ALARCÓN-JIMÉNEZ, M. F.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; BERNAL, J. H. Management zones base do corn yield and soil physical attributes. **Agronomía Colombiana**, v. 33, n. 3, p. 373–382, 2015.
- BERNI, J. A. J. *et al.* Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 722–738, 2009.
- BOGUE, R. Sensors key to advances in precision agriculture. **Sensor Review**, v. 37, n. 1, p. 1–6, 2017.
- BOTTEGA, E. L. *et al.* Precision agriculture applied to soybean: Part I - Delineation of management zones. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 5, p. 573–579, 2017.
- CHO, Y.; SUDDUTH, K. A.; CHUNG, S. O. Soil physical property estimation from soil strength and apparent electrical conductivity sensor data. **Biosystems Engineering**, v. 152, p. 68–78, 2016.
- DASH, J. P. *et al.* Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 1–14, 2017.
- DAVIS, A. P. *et al.* An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 152, n. 4, p. 465–512, 2006.
- DOERGE, T. A. Defineing management zones for precision farming. **Crop Insights**, v. 8, n. 21, p. 1–5, 1999.
- FARID, H. U. *et al.* Delineating site-specific management zones for precision agriculture. **Journal of Agricultural Science**, v. 154, n. 2, p. 273–286, 2016.

FLORES, M. DA S. *et al.* Relationship between vegetation indices and agronomic performance of maize varieties under different nitrogen rates. **Bioscience Journal**, v. 36, n. 5, p. 1638–1644, 2020.

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

ICO. International Coffee Organization. **Coffee production by exporting countries**. London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.ico.org/trade_statistics.asp>.

KATSUHAMA, N. *et al.* Discrimination of areas infected with coffee leaf rust using a vegetation index. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 12, p. 1168–1194, 2018.

KUIAWSKI, A. C. M. B. *et al.* Vegetation indexes and delineation of management zones for soybean1. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 2, p. 168–177, 2017.

MARIN, D. B. *et al.* Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. **Precision Agriculture**, n. 0123456789, 2021.

MEDEIROS, W. N. *et al.* Apparent soil electrical conductivity in two different soil types. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 1, p. 43–52, 2018.

PRIMICERIO, J. *et al.* A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 517–523, 2012.

SILVA, L. C. *et al.* Uso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na avaliação do desenvolvimento de cafeeiros do sul de Minas Gerais. **IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, n. 2001, p. 6, 2015.

SILVA, S. A. *et al.*; SANTOS, R. O.; QUEIROZ, D. M.; LIMA, J. S. S.; PAJEHU, L. F.; MEDAUAR, C. C. **Information Processing in Agriculture**, p. 1–31, 2021.

VEGA, F. A. *et al.* Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 19–27, 2015.

YAN, L. *et al.* An automated approach for sub-pixel registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, 2016.

CAPÍTULO II

Sensoriamento remoto na avaliação de atributos de solo e planta em lavoura de café arábica

RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) compreende um conjunto de técnicas e ferramentas que baseiam-se na utilização de insumos conforme as reais necessidades das áreas de produção agrícola. Para o auxílio na tomada de decisão pode-se empregar dados obtidos tanto por análises *in loco* quanto utilizando ferramentas de sensoriamento remoto. Na cafeicultura de montanha a aplicação da AP ainda é incipiente, principalmente por conta do relevo acidentado. Apesar disso, a identificação da variabilidade espacial de atributos de solo e planta e sua relação com a produtividade das culturas é um importante objeto de estudo. Diante disso, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a relação entre a variabilidade de atributos de solo e planta com a produtividade do café arábica. A pesquisa foi realizada em uma área de produção comercial da cultivar de café arábica Catuaí Amarelo IAC 62, localizada no município de Alegre – ES, a lavoura foi recepada a oito anos, a área não é irrigada e recebe manejo convencional pela média, de acordo com os resultados da análise de solo. A malha amostral utilizada na pesquisa foi irregular por conta do relevo local e possui 80 pontos georreferenciados. Conforme os pontos demarcados pela área, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 - 0,20m cujas foram realizadas análises físicas e químicas. Do mesmo modo, foram feitas medições de condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Ainda foram avaliados os índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), MPRI (Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado) e NDRE (Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge) e a produtividade obtida ao final da safra. Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas clássicas e geoestatística.

Com isso percebeu-se que as variáveis que determinam a produtividade do café arábica seguem em padrão de regionalização. Para que a CEa seja capaz de descrever a variação de atributos do solo é importante que as avaliações sejam realizadas no mesmo período. Para as condições dessa pesquisa, a CEa pode ser utilizada para descrever a variação de atributos como Na^+ , Al^{3+} , $\text{H}^+\text{+Al}^{3+}$, T, m%, V%, altitude e produtividade. Além disso os índices de vegetação mensurados na fase de granação dos frutos estão diretamente relacionados à produtividade dos cafeeiros.

Palavras-chave: Cafeicultura de montanha; Variabilidade espacial; Produtividade.

2.1 INTRODUÇÃO

O manejo dos campos de produção agrícola conforme suas necessidades específicas é um dos objetivos da Agricultura de Precisão (AP) (BADEWA *et al.*, 2018). A AP engloba o uso de informações espaciais e temporais para auxiliar nas tomadas de decisão relacionadas às práticas agrícolas que melhor correspondam às necessidades dos solos e das culturas (CORWIN; LESCH, 2005; PERALTA; COSTA, 2013).

Com o desenvolvimento de sistemas de posicionamento por satélite e o acesso a sensores de solo e planta, a AP teve um considerável desenvolvimento. A disponibilidade dessas tecnologias foi justamente o que permitiu o avanço da capacidade de medir e monitorar a variabilidade das culturas para adaptar o uso de insumos às condições específicas dos locais (HEDLEY, 2015). As tecnologias que surgiram nas últimas décadas e permitiram a modernização dos sistemas de produção de alimentos e podem manter culturas altamente produtivas, reduzindo os consequentes impactos ambientais (ESTEVES *et al.*, 2022). Das tecnologias em questão, destaca-se o uso de sensores mais modernos embarcados em plataformas como câmeras multiespectrais acopladas em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) que permitem a obtenção e o uso de índices de vegetação, que têm sido empregados com sucesso na AP para estimar diferentes atributos biofísicos e bioquímicos da vegetação (TOGEIRO DE ALCKMIN *et al.*, 2021).

A aplicação de ferramentas mais tecnificadas como tratores com aplicação de adubos a taxas variadas pode ser favorecida pela condição do relevo local (GROHER *et al.*, 2020). Em locais de relevo menos acidentado a aplicação de técnicas de AP se torna mais fácil por permitir a adoção de manejo mecanizado. No caso da cafeicultura de montanha, poucas são as técnicas de AP aplicadas, diferentemente do observado em outras culturas e áreas com relevo menos acidentado. Identificar essa variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo é um fator importante, pois são esses atributos os que mais influenciam na produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2007).

Por conta da necessidade de gerenciar melhor os recursos aplicados nas áreas de produção, é imperativo que se conheça a distribuição espacial das variáveis de solo e planta. Além disso é importante entender a relação entre

atributos de solo e planta e a produtividade da cultura. Portanto, o trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial dos atributos de solo e de planta de uma lavoura cultivada com café arábica e relacioná-los com a produtividade, utilizando-se de ferramentas do sensoriamento remoto e de sistemas de posicionamento por satélite.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Descrição do local de estudo

O trabalho foi desenvolvido em uma área de 2,9 ha localizada no distrito de Celina, no município de Alegre, região sul do Espírito Santo, Brasil (Figura 1), sob as coordenadas geográficas médias de 20°47'02" S e 41°35'57" W. O local possui variação de altitude com relevo forte ondulado, a amplitude altimétrica é de 80 m e a declividade média é de 35,7%. A área tem altitude média de 725 m e é cultivada com *Coffea arabica* L., cultivar catuaí amarelo IAC 62, no espaçamento de 1,5 m entre plantas e 2,5 m entre linhas. As plantas foram recepadas a cerca de oito anos para a renovação da lavoura. A lavoura não é irrigada e a adubação é feita pela média, de acordo com o recomendado pela interpretação da análise de solo. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média (SANTOS *et al.*, 2018). O clima do local, classificado como proposto por Köppen e Geiger (1928), é tropical úmido com temperatura média anual de 24 °C.

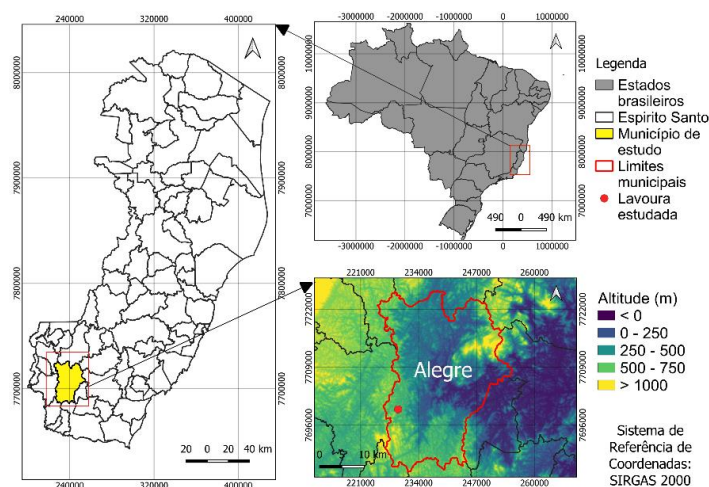


Figura 1 – Localização da área de estudo

2.2.2 Malha amostral, amostragem e análise de solo

Antes do início da coleta de dados, foi demarcada na área uma malha amostral irregular com 80 pontos georreferenciados por meio de um GPS de precisão subcentimétrica. Os pontos foram demarcados com etiquetas metálicas e enumerados para que todas as avaliações fossem realizadas nos mesmos locais (Figura 2). Com uma sonda de aço inoxidável, foram coletadas amostras de solo na camada de 0-0,20 m em cada um dos pontos, para análise física e química antes da adubação, que até o momento era feita pela média, obedecendo os resultados da análise de solo. Para formação de uma amostra composta foram coletadas três amostras simples, sendo elas referentes à planta demarcada e às duas plantas vizinhas a ela.

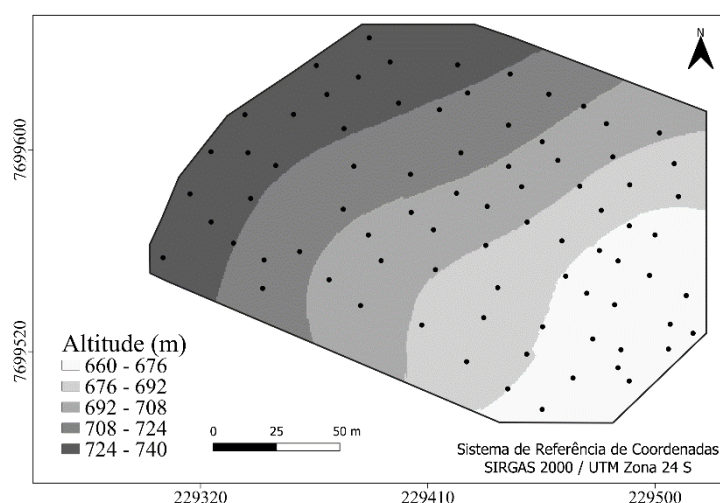


Figura 2 – Altitude e malha amostral na área de estudo.

Na análise física do solo foram determinadas as porcentagens de argila conforme metodologia apresentada por Teixeira *et al.* (2017). Nas análises químicas do solo os atributos determinados foram: fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), alumínio (Al^{3+}), acidez ativa (pH em água), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), calculados a soma de bases trocáveis (SB), capacidade efetiva de troca de cátions (t), capacidade de troca de cátions a pH 7 (T), índice de saturação por bases (V%) e o índice de saturação por Al^{3+} (m%). As análises foram realizadas de acordo com a metodologia apresentada por Teixeira *et al.* (2017).

2.2.3 Determinação da condutividade elétrica aparente do solo e determinação de umidade

As leituras de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) foram realizadas em três momentos, sendo o primeiro (CEa₁) em outubro de 2020, o segundo (CEa₂) em fevereiro de 2021 e o terceiro (CEa₃) em abril de 2022, nos 80 pontos da malha amostral. Para o levantamento dos valores da CEa foi utilizado um medidor portátil modelo LandMapper® ERM-01 de fabricação da Landviser (Houston - TX, U.S.A).

O sensor foi conectado a quatro eletrodos espaçados em 0,20 m por meio de uma haste confeccionada em tubos de PVC, que permitiu uma profundidade de medição de igual proporção, conforme a Matriz de Wenner cujo arranjo é apresentado na Figura 3 (CORWIN; HENDRICKS, 2002; CORWIN; LESCH, 2003).

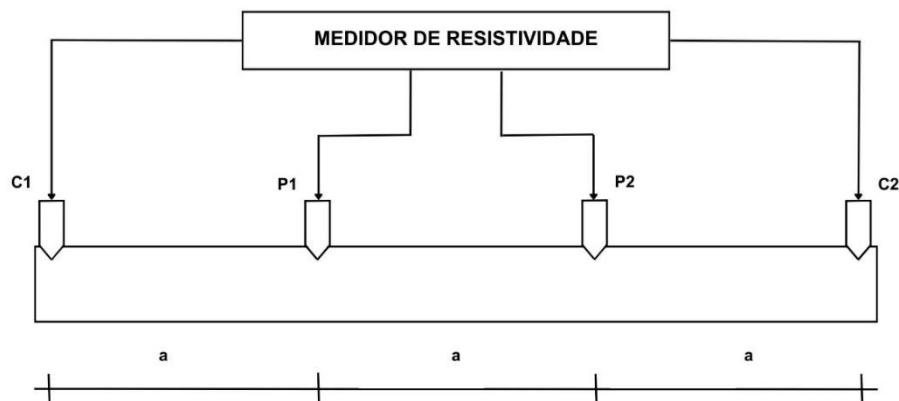


Figura 3 - Método de medida de resistividade elétrica com o arranjo de quatro eletrodos. Eletrodos de corrente C1 e C2; Eletrodos de potencial P1 e P2; a espaçamento entre os eletrodos. Fonte: Adaptado de Corwin e Lesch (2003).

O método baseado na configuração da Matriz de Wenner é fundamentado na resistividade, demonstrada na Equação 1.

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

onde:

ρ = Resistividade, Ohm m;

α = Espaçamento entre eletrodos, m;

ΔV = Diferença de potencial, V;

i = Corrente elétrica, A.

A condutividade elétrica aparente do solo é o inverso da resistividade (GIROTTO; SANTOS, 2002), que pode ser determinada pela Equação 2.

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

onde:

CEa = Condutividade elétrica aparente $mS\ m^{-1}$.

Conjuntamente com as avaliações de CEa , foram coletadas amostras de solo para a determinação de sua umidade. Ao todo foram coletadas 30 amostras, de forma aleatória, ao longo da área com o intuito de obter maior representatividade no momento da leitura da CEa .

As amostras úmidas foram armazenadas em latas de alumínio e após serem pesadas, foram secas em estufa a $105^{\circ}C$ por 72 horas e pesadas novamente para a obtenção da massa seca. Dessa forma, foi possível obter a porcentagem de água presente no solo (Equação 3).

$$U(\%) = \frac{A - B}{B} \cdot 100 \quad (3)$$

onde:

U% = Umidade gravimétrica;

A = Massa da amostra úmida (g);

B = Massa da amostra seca (g).

2.2.4 Aerolevanteamento e cálculo dos índices de vegetação

Os atributos de planta foram determinados indiretamente a partir de informações espectrais das plantas obtidas com sensor embarcado em Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Foram realizadas coletas de imagens aéreas da área de estudo em dois momentos para a obtenção dos índices de vegetação MPRI (Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado), NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e NDRE (Índice de vegetação da

diferença normalizada do RedEdge). O primeiro aerolevanteamento foi efetuado em dezembro de 2020 (MPRI₁, NDVI₁ e NDRE₁) e o segundo em fevereiro de 2021 (MPRI₂, NDVI₂ e NDRE₂).

Os aerolevanteamentos foram realizados utilizando sensor óptico multiespectral embarcado em um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Foi utilizado o sensor óptico multiespectral RedEdge MX equipado com lentes 47.9° HFOV 5.4 mm, que captura segmentos dos comprimentos de onda do espectro eletromagnético do visível (vermelho – R, verde – G e azul – B), do RedEdge e do infravermelho próximo (NIR).

Os voos automatizados foram realizados respeitando a janela de voo de 11 às 13h e seguindo planejamento pré-estabelecido. Os voos foram realizados a uma altura máxima de 120m e o número de cenas (imagens) obtidas por voo, bem como a velocidade e as sobreposições laterais e horizontais foram definidas após testes preliminares.

Para eliminar as distorções causadas pelas características internas da câmera foram realizadas calibrações geométricas das imagens. As calibrações radiométricas foram realizadas para converter os números digitais (ND) para valores físicos de reflectância. As calibrações radiométricas foram realizadas a partir da resposta espectral de alvos de referência espalhados por toda a extensão da área e também a partir dos acessórios de calibração de imagens que acompanham o sensor multiespectral.

As imagens calibradas foram processadas para obtenção dos mosaicos de ortofotos (ortomosaicos) utilizando o software livre OpenDroneMap (DroneMapping Software). Foram utilizados, para aumentar a precisão posicional dos ortomosaicos, onze pontos de controle fotointerpretáveis distribuídos de forma estratégica por toda a extensão da área. Os pontos de controle foram georreferenciados utilizando um receptor GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) de precisão sub-centimétrica.

Após a obtenção das imagens do sensoriamento remoto aéreo o vigor vegetativo das plantas foi estimado utilizando índices de vegetação calculados a partir dos valores de reflectância da copa dos cafeeiros. Foram calculados inicialmente três índices de vegetação: MPRI – Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado (YANG; WILLIS; MUELLER, 2008), estimado pela Equação 4:

$$MPRI = \frac{Green - Red}{Green + Red} \quad (4)$$

onde:

Green = valores de reflectância na banda do verde, e;

Red = valores de reflectância na banda do vermelho.

NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (ROUSE *et al.*, 1974), estimado pela Equação (5):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (5)$$

onde:

NIR = valores de reflectância na banda do infravermelho próximo, e;

Red = valores de reflectância na banda do vermelho.

NDRE – Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge (BUSCHMANN; NAGEL, 1993), estimado pela Equação (6):

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge} \quad (6)$$

onde:

NIR = valores de reflectância na banda do infravermelho, e;

RedEdge = valores de reflectância na banda do RedEdge.

2.2.5 Determinação de produtividade

Na ocasião da colheita, os frutos foram derriçados manualmente em lonas e a produção de cada planta, correspondente à malha amostral, foi pesada separadamente. Do café úmido foram retiradas nove amostras de 1,0 kg que foram mantidas em estufa a 40° C até atingir ± 12% de umidade (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013). O café beneficiado foi determinado retirando-se a casca dos grãos secos, sendo esses submetidos à pesagem, obtendo-se a massa de café beneficiado. De posse da área correspondente a cada ponto, obtida por meio das medidas de espaçamento entre as plantas, os valores de café úmido e os

valores de café beneficiados foram convertidos em kg ha⁻¹ (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013).

2.2.6 Análises estatísticas e geoestatísticas

Após a obtenção dos dados para as variáveis avaliadas, esses foram submetidos à análise exploratória para verificar a presença de valores discrepantes (*outliers*) e a interferência sobre as medidas de tendência central. Depois da retirada dos *outliers*, os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, onde foram determinadas as medidas de posição (média e mediana), dispersão (valores máximos, mínimos, e coeficiente de variação) e forma da distribuição dos dados (coeficientes de assimetria e curtose).

As análises geoestatísticas foram realizadas para avaliar e quantificar o grau de dependência espacial das variáveis, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais clássicos de Matheron conforme Equação 7.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

onde:

$\gamma(h)$ = função variograma;

$N(h)$ = números de pares de pontos observados;

$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ = são os valores da variável regionalizada nos pontos x_i e x_i+h respectivamente.

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, foram determinados os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), contribuição (C_1) e alcance (a). Os valores de C_0 e C_0+C_1 foram escalonados dividindo-se os valores obtidos pela variância dos dados (VIEIRA *et al.*, 1983). O melhor modelo de variograma foi escolhido tendo como critério a menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R^2), foram testados os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear.

Para a análise da dependência espacial foi calculado o índice de dependência espacial (IDE), utilizando a relação $[C_0/(C_0+C_1)]$ e os intervalos

propostos por Cambardella *et al.* (1994), que considera a dependência espacial forte ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e fraca ($IDE \geq 75\%$). Tendo-se verificada a dependência espacial de cada variável, foram elaborados os mapas de variabilidade espacial, utilizando a krigagem ordinária como técnica de interpolação. A krigagem foi usada para estimar valores para locais não amostrados, considerando os parâmetros do variograma, que resulta em valores sem tendência e com variância mínima (SILVA *et al.*, 2008).

Após a definição dos mapas de dependência espacial foi realizada a análise de correlação entre: a) os mapas de condutividade elétrica aparente e os atributos do solo; b) condutividade elétrica aparente e a produtividade da lavoura, e; c) mapas dos índices de vegetação estudados e a produtividade da lavoura.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de CEa, do teor de água no solo e o coeficiente de variação para esta última variável são apresentados na Tabela 1. De acordo com Ekwue; Bartholomew (2011), nas medições de CEa, deve-se levar em consideração o teor de água no solo, pois pode influenciar no valor do índice.

Tabela 1 – Valores médios de CEa e teor de água no solo em diferentes momentos de medição

Medições	CEa Média (mS m ⁻¹)	Teor de água do solo		Correlação
		Média (%)	CV (%)	
CEa ₁	1,12	16,26	26,97	-0,50
CEa ₂	1,56	22,80	65,15	-0,14
CEa ₃	2,82	23,38	23,55	0,08

Negrito é significativo

A maior média de CEa (medida 3) coincidiu com o maior valor médio do teor de água no solo, corroborando com os resultados de Silva *et al.* (2021). Segundo Costa *et al.* (2014), quanto maior o teor de água, maiores os valores médios de CEa. Ainda segundo Silva *et al.* (2021), a CEa do solo depende da disponibilidade de água e da textura do solo. Nenhuma medida de CEa apresentou valores de coeficiente de variação baixos. Enquanto a primeira e a

terceira medidas apresentaram variação média, a segunda avaliação apresentou variabilidade alta, sendo maior do que 60%, conforme classificação proposta por Warrick e Nielslen (1980). Houve correlação significativa apenas para a primeira medição, a qual apresentou correlação negativa entre a umidade do solo e a CEa. Considerando os diferentes momentos de avaliação entre a segunda e terceira avaliação, percebe-se que as variações não foram significativas, o que demonstra tendência de estabilidade temporal (SILVA *et al.*, 2022).

A Tabela 2 apresenta a análise exploratória dos valores dos atributos de solo e planta após a retirada dos valores discrepantes. Observa-se que os dados de média e mediana são semelhantes para as mesma variáveis, indicando grande proximidade entre os valores de tendência central. Bottega *et al.* (2015), em um Latossolo, encontraram valores médios de $H^+ + Al^{3+}$ e SB de 5,1%, valores próximos aos obtidos nessa pesquisa, de 4,84 e 5,32%, respectivamente. Valores médios similares de pH foram observados por Negreiros Neto *et al.* (2014), onde o pH foi de 5,89. Os mesmos autores também encontraram valores próximos para a V% de 60,60%, enquanto neste trabalho a V% foi de 52,22%.

Tabela 2 – Estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos de solo e planta do cafeeiro.

Variável	Me	Md	Mín	Máx	Cv	Cs	Ck	W
Alt	699,80	700,11	662,05	741,00	3,50	0,07	-1,23	0,9435
Arg	36,41	37,48	24,35	46,49	12,52	-0,70	0,36	0,9521
P	7,45	7,00	1,00	18,00	59,81	0,52	-0,77	0,9377
K^+	217,82	217,50	102,60	330,00	22,07	0,03	0,00	0,9906
Ca^{2+}	3,60	3,50	1,20	5,70	30,89	-0,19	-0,49	0,9798
Mg^{2+}	1,15	1,10	0,40	2,00	26,80	0,05	0,03	0,9863
Na	2,40	2,00	0,00	6,00	58,21	0,62	-0,01	0,9297
Al^{3+}	0,05	0,00	0,00	0,20	150,36	1,21	0,20	0,6651
pH	5,63	5,60	5,00	6,50	6,14	0,27	-0,36	0,9773
$H^+ + Al^{3+}$	4,84	4,80	0,50	8,90	38,25	0,26	-0,52	0,9798
SB	5,32	5,20	2,00	7,90	26,72	-0,19	-0,48	0,9818
t	5,45	5,30	2,90	7,90	23,13	0,08	-0,68	0,9778
T	10,15	9,90	7,30	14,50	15,06	0,56	-0,12	0,9714
V%	52,22	54,40	20,40	78,90	26,46	-0,31	-0,37	0,9786

Variável	Me	Md	Mín	Máx	Cv	Cs	Ck	W
m%	1,33	0,00	0,00	8,60	173,07	1,88	2,63	0,6459
NDVI ₁	0,91	0,91	0,85	0,94	2,37	-0,75	-0,02	0,9258
NDVI ₂	0,91	0,91	0,88	0,94	1,58	0,07	-0,29	0,9523
NDRE ₁	0,51	0,51	0,44	0,56	5,39	-0,52	-0,08	0,9495
NDRE ₂	0,47	0,47	0,41	0,55	6,58	0,33	-0,39	0,9668
MPRI ₁	0,42	0,44	0,27	0,52	13,68	-0,53	-0,49	0,9573
MPRI ₂	0,45	0,45	0,34	0,55	11,15	0,04	-0,46	0,9854
CEa ₁	1,12	1,05	0,56	1,81	26,97	0,36	-0,74	0,9656
CEa ₂	1,56	1,18	0,74	5,78	65,15	2,51	6,34	0,6691
CEa ₃	2,82	2,86	1,55	4,19	23,55	-0,06	-0,97	0,9734
Prod	491,44	436,73	9,29	1611,69	79,75	0,96	0,64	0,9081

CV: coeficiente de variação; CS: coeficiente de assimetria; CK: coeficiente de curtose; w: teste de Shapiro-Wilk's a 5%; Negrito: significativo. Alt – altitude (m); Arg – argila (g kg⁻¹); P– mg dm⁻³; K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Al²⁺, H⁺+Al²⁺, SB, CTC efetiva (t), CTC pH 7,0 (T) – cmolc dm³; V – saturação por bases (%); m – saturação por alumínio (%); NDVI; NDRE; MPRI; CEa₁; CEa₂; CEa₃; Prod – Produtividade do café beneficiado (kg ha⁻¹). Solo analisado quimicamente conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) - pH H₂O, Al (KCl 1 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹).

Em relação a todos os resultados apresentados na Tabela 2 observa-se que tanto os valores de média, de mediana e de máximo foram semelhantes nos dois períodos de avaliação. Chemura; Mutanga; Dube (2017), avaliando o NDVI em plantas de café com o sensor OLI do satélite Landsat 8, observaram valores menores do que 0,70 em todas as leituras realizadas. Para Mesquita Júnior *et al.* (2011), utilizando dados do sensor MODIS do satélite TERRA, os valores de NDVI foram entre 0,62 e 0,82. Os resultados mais próximos ao deste estudo, encontrados em literatura, foram no estudo de Rodrigues *et al.* (2019), que utilizaram o sensor Crop Circle, onde foram identificados valores de NDVI variando entre 0,85 a 0,96 em uma lavoura de 896 m de altitude e 0,88 a 0,94 em uma lavoura de 1043 m de altitude. Esses elevados valores de NDVI encontrados no período dessa pesquisa podem ser em decorrência do grande volume de folhas nas plantas, uma vez que as avaliações foram realizadas antes do período da colheita.

Quanto ao NDRE, os valores de média e mediana foram iguais nas duas medições, ocorrendo uma diminuição do valor no segundo período avaliado. Os

valores de mínimo e máximo também foram menores na segunda avaliação, o que justifica a redução das medidas de tendência central. Os valores de NDRE são menores que os de NDVI, pois a reflectância na banda do RedEdge é maior que na banda do vermelho. Isso permite melhor estratificar a resposta das plantas e minimiza o risco de saturação nos índices. Os valores observados nessa pesquisa também corroboram com Rodrigues *et al.* (2019), avaliando dois locais os autores encontraram valores de NDRE variando entre 0,37 a 0,53 em uma área e 0,34 a 0,49 em outro local com altitude mais elevada.

Sobre o MPRI, os valores de média e de mediana foram bem próximos em ambas as medições, embora as leituras tenham sido feitas em épocas diferentes. Segundo Barbosa *et al.* (2021), o solo e a vegetação são bem segmentados pelo MPRI, podendo inclusive verificar a intensidade de competição com plantas daninhas, indicando que o monitoramento por meio de índices de vegetação tem significativo potencial para as atividades de controle e planejamento.

Em relação à avaliação da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), os valores na primeira leitura variaram entre 0,56 a 1,81, já na segunda e terceira avaliação houve maior diferença entre esses valores, variando entre 0,74 a 5,78 e 1,55 a 4,19 respectivamente. Os valores foram consideravelmente inferiores aos resultados de Silva *et al.* (2021), avaliando a CEa em um Nitossolo com valores médios de 3,81 até 22,36. Já para um Latossolo, Bottega *et al.* (2015) encontraram valores de mínimo e máximo variando entre 1,0 e 5,0 mS m^{-1} .

Os coeficientes de variação foram baixos para a maioria das variáveis com exceção da CEa que apresentou valores de 28,44 e 31,60 para a primeira e a segunda medições, respectivamente. Essa maior variação para CEa pode ocorrer por conta de variações adicionais de variáveis que são amplamente correlacionadas com essa variável, como os teores de sólidos em solução, a textura (em especial argila). Adhikari *et al.* (2022), mapeando a CEa e estabelecendo relações desta com propriedades do solo também encontraram elevada variação para esta variável. Segundo os autores é comum a CEa incorporar parte da variação daqueles atributos que a determina.

Segundo os resultados apresentados na Tabela 2 os dados de altitude, NDVI_1 , NDRE_1 e ambos os dados de CEa são significativos pelo teste de Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade, o que indica distribuição fora da

normalidade para tais variáveis no período avaliado. Aproximadamente 56% das variáveis analisadas apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade, sendo a maioria dessas, atributos de planta e não de solo. A ausência de normalidade na distribuição dos atributos químicos do solo pode ser devido à ausência de uniformidade na adubação (BOTTEGA *et al.*, 2015), uma vez que é realizada manualmente o que, somando ao fato de ser uma área declivosa, não apresenta homogeneidade de doses durante a aplicação. Em relação aos atributos químicos do solo, os valores de média e mediana foram similares, o que demonstra que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

A respeito dos coeficientes de variação, pode-se inferir que apenas as variáveis Al, m%, CEa2 e Produtividade apresentaram variabilidade alta, segundo classificação proposta por Warrick & Nielslen (1980). Entre os que apresentaram variabilidade baixa estão pH, altitude, NDVI₁, NDVI₂, NDRE₁, NDRE₂ e MPRI₂. Os demais atributos apresentaram média variabilidade.

Para o nutriente fósforo, os valores encontrados variaram entre 1,00 a 18,00 mg dm⁻³, com média de 7,45 mg dm⁻³, valor considerado baixo (PREZOTTI *et al.*, 2007). Os baixos valores de fósforo no solo podem ser atribuídos à sua fixação pelos minerais de argila e pela erosão do solo (ALEWELL *et al.*, 2020; NADEEM *et al.*, 2022). Na área de estudo foi obtida uma concentração média de potássio de 217,82 mg dm⁻³, valor considerado muito bom por Prezotti *et al.* (2007), indicando nível ideal deste para a produção de café. A disponibilidade de K encontrada no solo em questão pode ser devido a adubações feitas anteriormente ao estudo (SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos variogramas médios escalonados para as variáveis estudadas. Nota-se que todas as variáveis apresentaram dependência espacial, sendo os modelos teóricos Gaussiano, Esférico e Exponencial os que melhor se ajustaram aos modelos experimentais. Os resultados da análise geoestatística indicam que todas variáveis estudadas, até o alcance de semivariância, possuem distribuição regionalizada e não aleatória (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013).

Tabela 3 – Modelos e parâmetros dos variogramas médios escalonados ajustados aos atributos de solo e planta do cafeeiro.

Atributo	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a (m)	IDE (%)	SE Pred
Alt	Gau	0,00	3,51	267,00	0,04	0,91
Arg	Exp	0,00	1,14	91,00	0,04	3,44
P	Esf	0,00	1,07	83,00	0,04	2,94
K ⁺	Esf	0,31	0,87	20,00	35,65	42,23
Ca ²⁺	Gau	0,05	1,03	19,00	4,90	1,05
Mg ²⁺	Gau	0,00	0,10	21,00	0,09	0,30
Na ⁺	Exp	0,22	1,41	188,00	15,63	1,26
Al ³⁺	Esf	0,00	1,00	14,00	0,64	0,06
pH	Esf	0,42	1,05	35,00	40,12	0,33
H ⁺ +Al ³⁺	Gau	0,00	0,79	20,00	0,07	1,61
SB	Exp	0,16	1,08	35,00	14,88	1,35
t	Exp	0,16	1,08	37,00	15,70	1,19
T	Gau	0,34	1,98	227,00	17,49	1,02
V%	Esf	0,52	1,04	40,00	49,97	12,80
m%	Esf	0,12	0,95	30,00	12,65	1,67
NDVI ₁	Gau	0,54	1,11	62,00	48,73	0,01
NDVI ₂	Esf	0,01	0,98	23,00	1,93	0,01
NDRE ₁	Exp	0,12	1,04	49,00	11,72	0,02
NDRE ₂	Esf	0,03	1,27	97,00	2,85	0,02
MPRI ₁	Gau	0,56	1,16	77,00	48,33	0,04
MPRI ₂	Exp	0,28	1,05	52,00	26,49	0,04
CEa ₁	Gau	0,62	1,29	168,00	48,73	0,25
CEa ₂	Gau	0,00	1,02	22,00	0,11	0,92
CEa ₃	Exp	0,09	0,98	14,00	9,38	0,67
Prod	Exp	0,26	1,08	82,00	24,05	315,23

C₀ - efeito pepita escalonado; C₀+C₁ - patamar escalonado; a - alcance; IDE - Índice de Dependência Espacial; SE Pred – erro padrão da estimativa; Gau – Gaussiano; Esf. – Esférico; Exp – Exponencial; Alt – altitude (m); Arg – argila (g kg⁻¹); P– mg dm⁻³; K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Al²⁺, H⁺+Al²⁺, SB, CTC efetiva (t), CTC pH 7,0 (T) – cmolc dm⁻³; V – saturação por bases (%); m – saturação por alumínio (%); NDVI; NDRE; MPRI; CEa₁; CEa₂; CEa₃; Prod – Produtividade do café beneficiado (kg ha⁻¹). Solo analisado quimicamente conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) - pH H₂O, Al (KCl 1 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹).

Nota-se que todas as variáveis apresentaram dependência espacial, sendo os modelos teóricos Gaussiano, Esférico e Exponencial os que melhor se ajustaram aos modelos experimentais. Os resultados da análise geoestatística indicam que todas variáveis estudadas, até o alcance de semivariância, possuem distribuição regionalizada e não aleatória (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013).

Com exceção das variáveis pH, K⁺, V%, NDVI₁, MPRI₁, MPRI₂ e CEa₁, que apresentaram dependência espacial moderada, todas as outras variáveis apresentaram índice de dependência espacial (IDE) considerado forte segundo classificação apresentada por Cambardella *et al.* (1994), com valores de IDE inferiores a 25%.

Os modelos teóricos gaussiano e esférico se ajustaram aos modelos experimentais do NDVI para o primeiro e segundo mês de avaliação, respectivamente. Esses resultados corroboram os encontrados por Zanzarini *et al.* (2013), que estudaram a distribuição espacial do NDVI na cultura da cana-de-açúcar. Para o NDRE, os modelos teóricos foram exponencial e esférico para o primeiro e segundo mês de estudo, respectivamente. Rodrigues *et al.* (2019), estudando a cultura do café também chegaram ao modelo esférico como melhor modelo teórico ajustado aos dados de NDRE.

Quanto à altitude, concordando também com os resultados de Rodrigues *et al.* (2019) nas duas lavouras estudadas, os dados adequaram-se melhor ao modelo gaussiano, atingindo alcance de 210 m.

Em referência aos atributos de solo nota-se que os maiores alcances foram obtidos pelos atributos T e Na²⁺, sendo 227 e 188m, respectivamente. O menor alcance foi observado para o atributo Al. Os altos valores de alcance para os atributos T e Na²⁺, confirmam que, dentro deste intervalo, o atributo apresenta baixa variabilidade espacial, pois sua área de influência será maior, sugerindo uma maior semelhança entre os pontos vizinhos, sendo característica uma alta continuidade (CARVALHO *et al.*, 2018).

Após a definição dos parâmetros dos variogramas, os dados foram interpolados para a elaboração dos mapas temáticos de variabilidade espacial (Figuras 4 a 7). Em relação a variável altitude, estudando o mapa de variabilidade espacial, exposto na Figura 4, pode-se confirmar a alta dependência espacial, e

a visível continuidade da característica amostrada, como bem apresentado no variograma apresentado anteriormente.

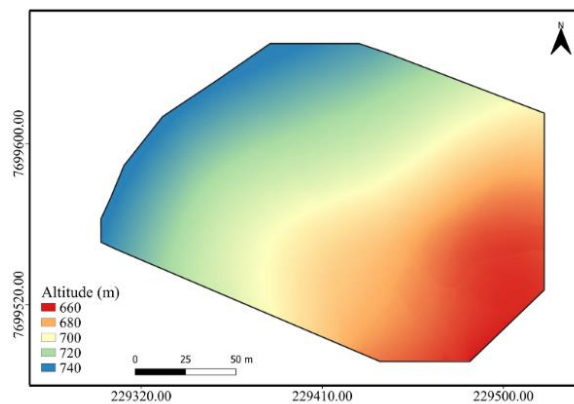
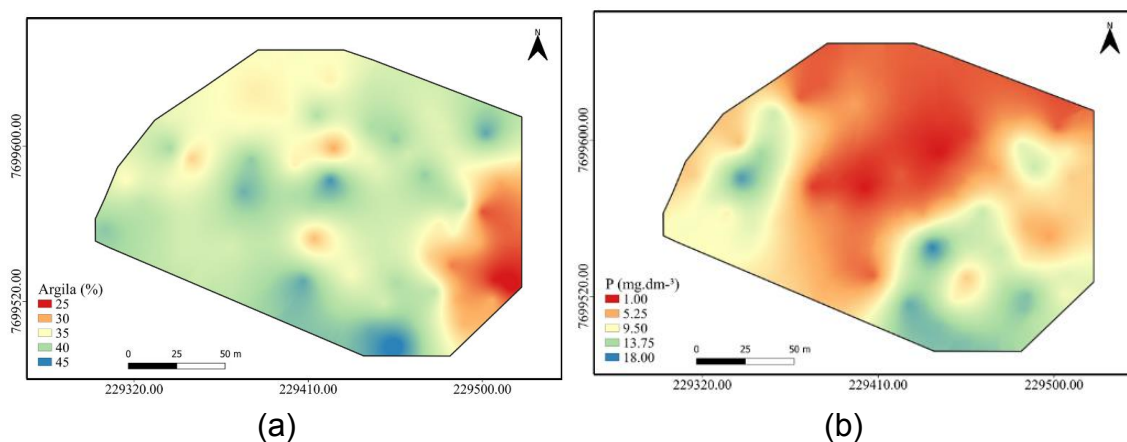
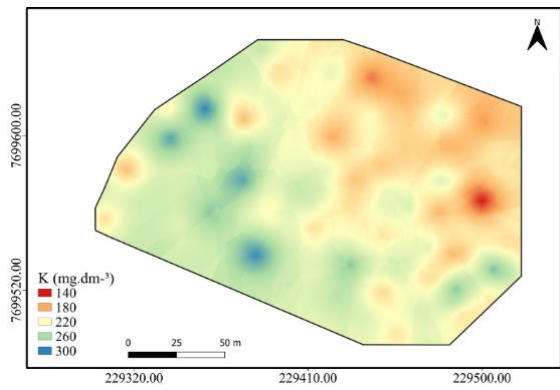


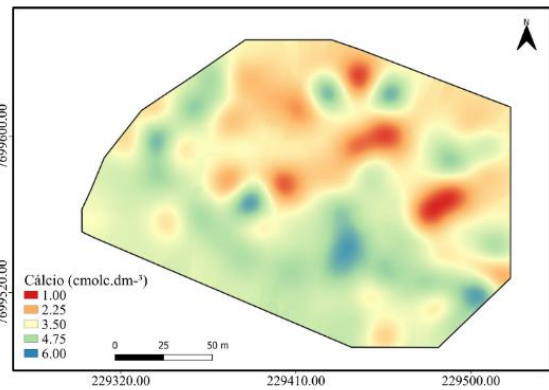
Figura 4 – Distribuição espacial da altitude em lavoura cafeeira.

Na Figura 5 são apresentados os mapas temáticos da distribuição espacial dos atributos de solo na área da lavoura estudada. A Figura 5 (a) apresenta a distribuição espacial do teor de argila na área estudada. Observa-se que não há uma tendência de distribuição em relação ao relevo da área, encontrando-se valores altos e baixos de concentração de argila em diversos pontos da área, embora concentre-se menos na parte mais baixa do terreno. De acordo com Galvão; Silva e Lima (2014), a argila se mostra de forma inversa à areia no terreno devido ao comportamento dessas variáveis no escoamento superficial no processo erosivo, assim pode-se supor que o teor de areia na área estudada também é maior na parte mais baixa do terreno estudado.

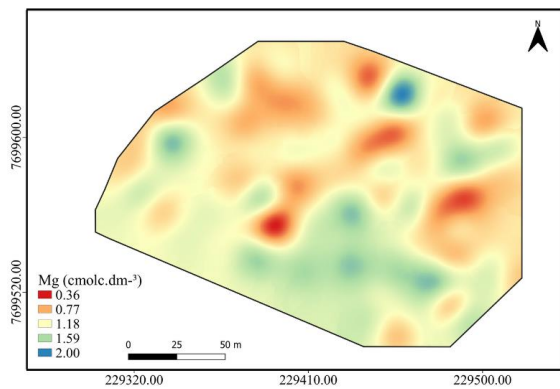




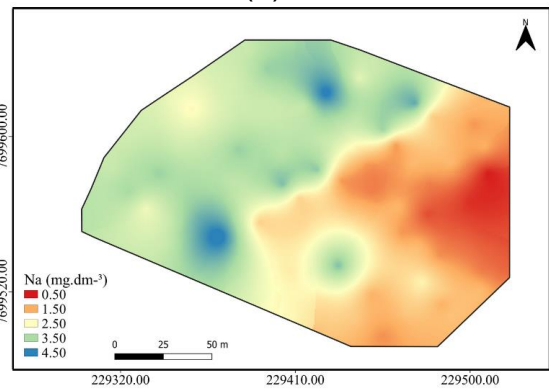
(c)



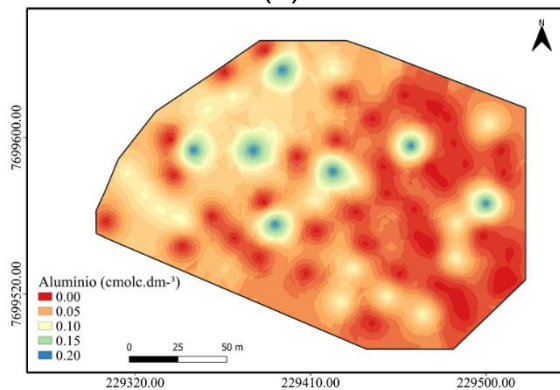
(d)



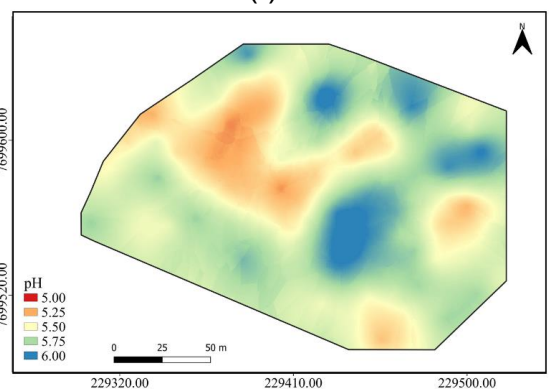
(e)



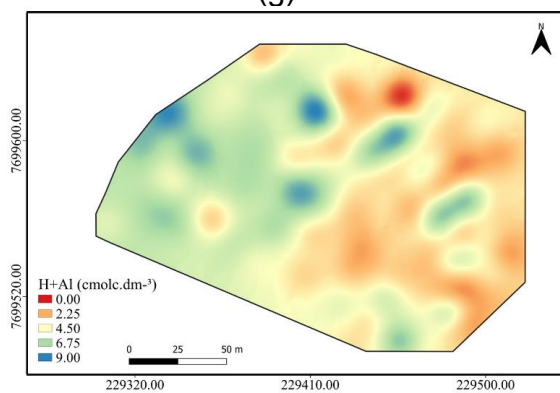
(f)



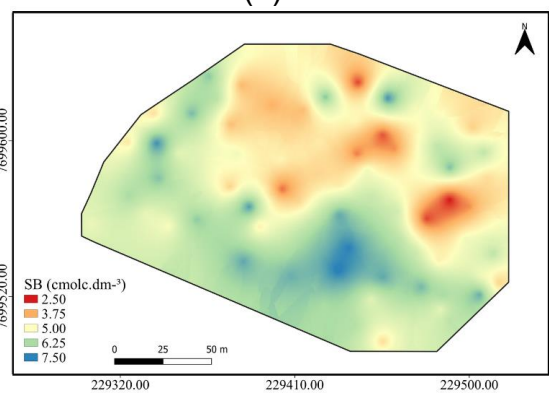
(g)



(h)



(i)



(j)

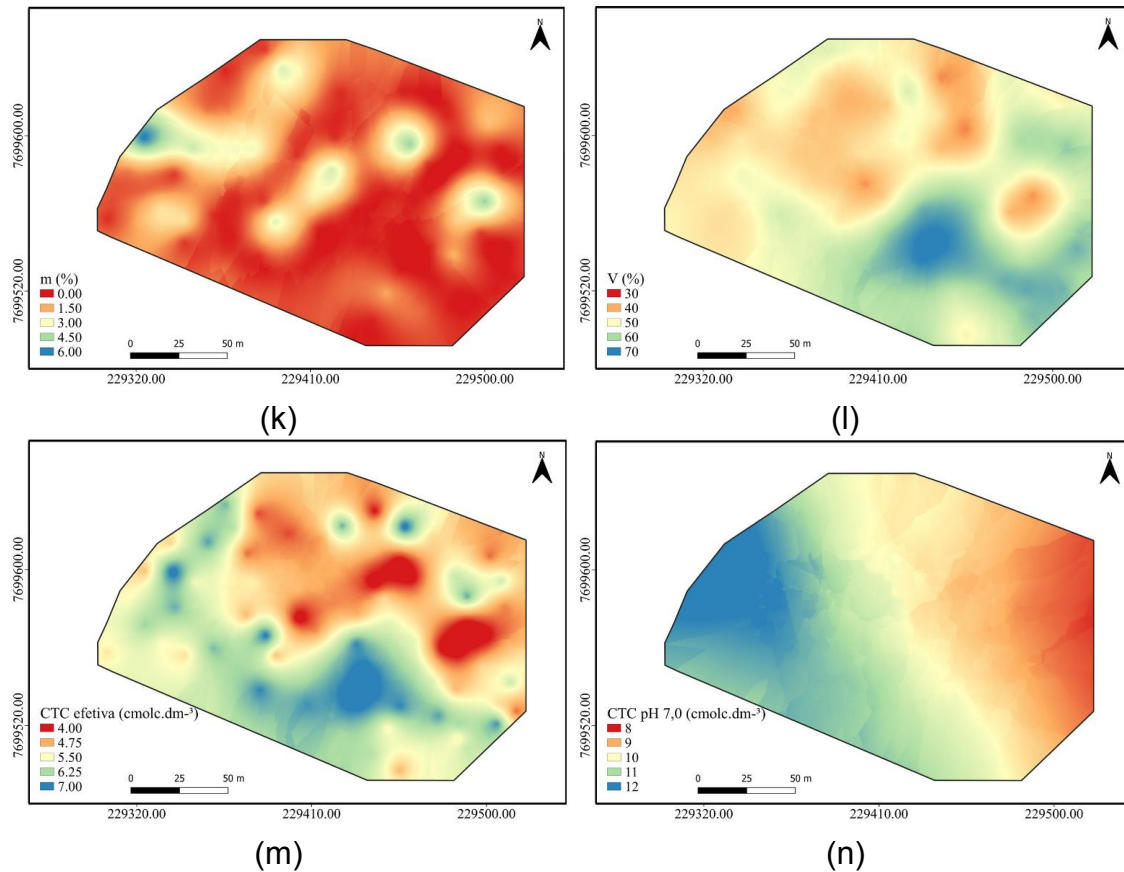


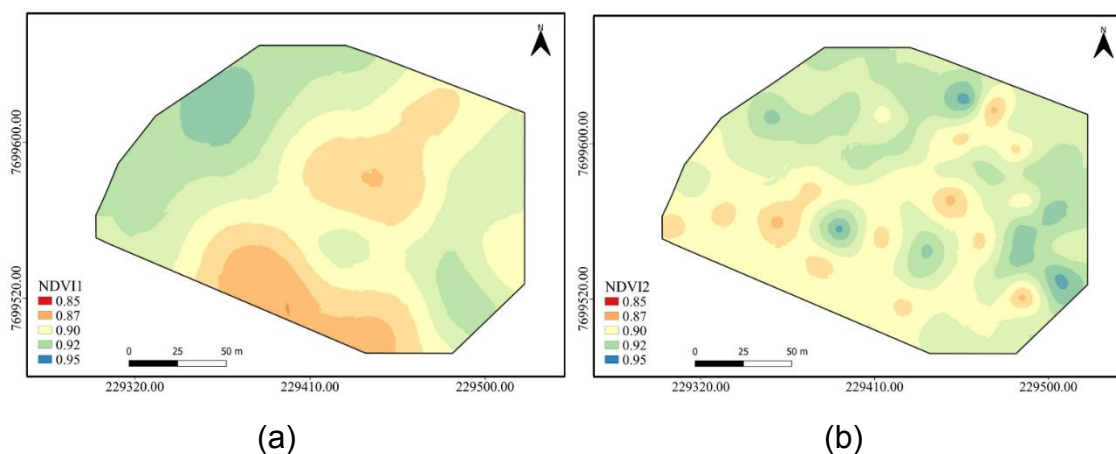
Figura 5 – Distribuição espacial de atributos de solo em uma lavoura cafeeira. (a) Argila; (b) Teor de fósforo; (c) Teor de potássio; (d) Teor de Cálcio; (e) Teor de magnésio; (f) Teor de sódio; (g) Teor de alumínio; (h) pH do solo; (i) Acidez potencial; (j) Soma de Bases; (k) CTC potencial (t); (l) CTC a pH 7,0 (T); (m) Saturação de bases; (n) Saturação por alumínio.

Observa-se na Figura 5 (h), que as manchas com menores valores de pH coincidem com os locais com maiores valores de Al^{3+} , Figura 5 (g), e conseqüentemente, também maiores valores de saturação por alumínio (m), respectivamente, Figura 5 (k). Isso ocorre porque em pH maior que 5,6, praticamente todo Al^{3+} presente no solo é neutralizado (DADALTO; FULLIN, 2001). Quanto aos mapas de pH e acidez potencial, pode-se verificar que os maiores valores de pH coincidiram com as áreas de menor acidez potencial. As manchas observadas em alguns mapas da distribuição espacial de atributos químicos, como teor de alumínio e saturação por alumínio, são explicadas pela baixa precisão da estimativa de valores em locais não amostrados (BOTTEGA *et al.*, 2013). O contrário é observado nos mapas temáticos de distribuição espacial da argila, T, P e Na^+ .

Também foi observada relação entre os mapas dos teores de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} com os mapas de SB e t, sendo importante salientar que os teores de K, Ca^{2+} e Mg^{2+} influenciam diretamente nos valores de SB do solo. Houve concentração dos maiores valores na parte nordeste da área de estudo. Isso pode ser justificado pela forma de distribuição de fertilizantes, que é realizada manualmente, fazendo com que a aplicação seja desuniforme.

Observando os mapas verifica-se que a distribuição espacial do NDVI é bem semelhante à do NDRE e ainda mais com o MPRI na primeira avaliação (Figura 6). Isso ocorre por conta de os índices levarem em consideração a banda do vermelho ou do RedEdge. A distribuição do NDVI e MPRI também são semelhantes na segunda avaliação, o que não acontece com o NDRE, isso pode ocorrer por conta de a escala ter sido projetada para favorecer a comparação entre os índices em uma escala espacial e temporal. De acordo com Babar *et al.* (2006), valores mais altos de NDVI estão associados a uma alta taxa de crescimento e maior acúmulo de biomassa durante o estágio vegetativo da cultura, fazendo com que o período de enchimento de grãos seja mais longo e aumentando a produtividade do trigo. Segundo Nogueira; Moreira; Volpato (2018), o NDVI teve as melhores correlações com a produtividade nos estádios de dormência e floração do cafeeiro.

Em outras culturas o NDRE mostrou-se útil para a identificação de deficiências nutricionais, sendo também um preditor de biomassa quando comparado ao NDVI, que usa a banda vermelha do mesmo sensor (TAUBINGER; AMARAL; MOLIN, 2012; AMARAL *et al.*, 2015). Esses resultados, segundo os autores está associado ao fato dele ser um índice menos influenciado pela cor do dossel e do substrato.



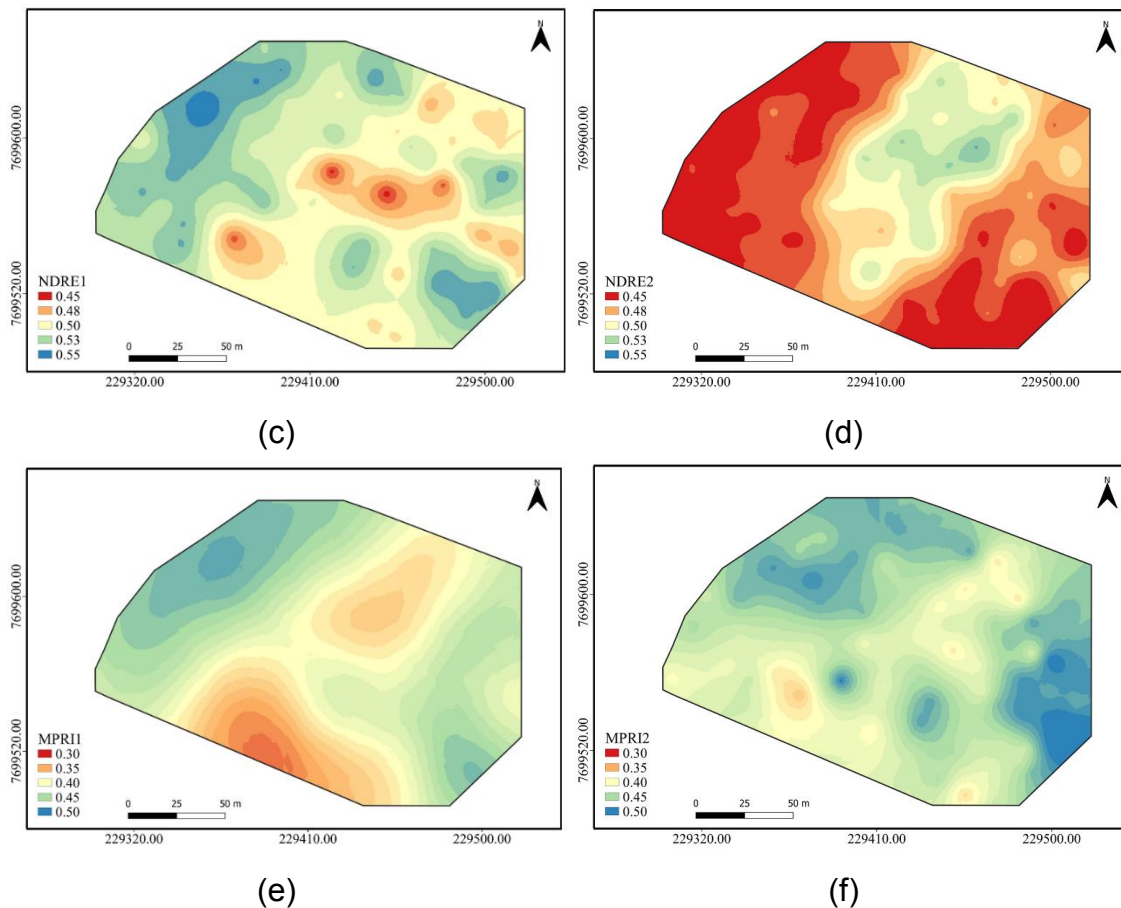


Figura 6 – Distribuição espacial de índices de vegetação em uma lavoura cafeeira. (a) NDVI₁; (b) NDVI₂; (c) NDRE₁; (d) NDRE₂; (e) MPR₁₁ e (f) MPR₁₂.

A CEa correlaciona-se de forma significativa com atributos do solo como os teores de fósforo, fósforo remanescente e zinco (BOTTEGA *et al.*, 2015). O mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo demonstra grande potencial de aplicação na AP, pois a aquisição dessa informação é rápida e possui baixo custo em relação a outras análises.

Os mapas da distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo encontram-se representados na Figura 7. A distribuição da CEa não foi uniforme, nem seguiu um padrão na variabilidade temporal, diferente dos resultados encontrados por Oldoni; Bassoi, (2015).

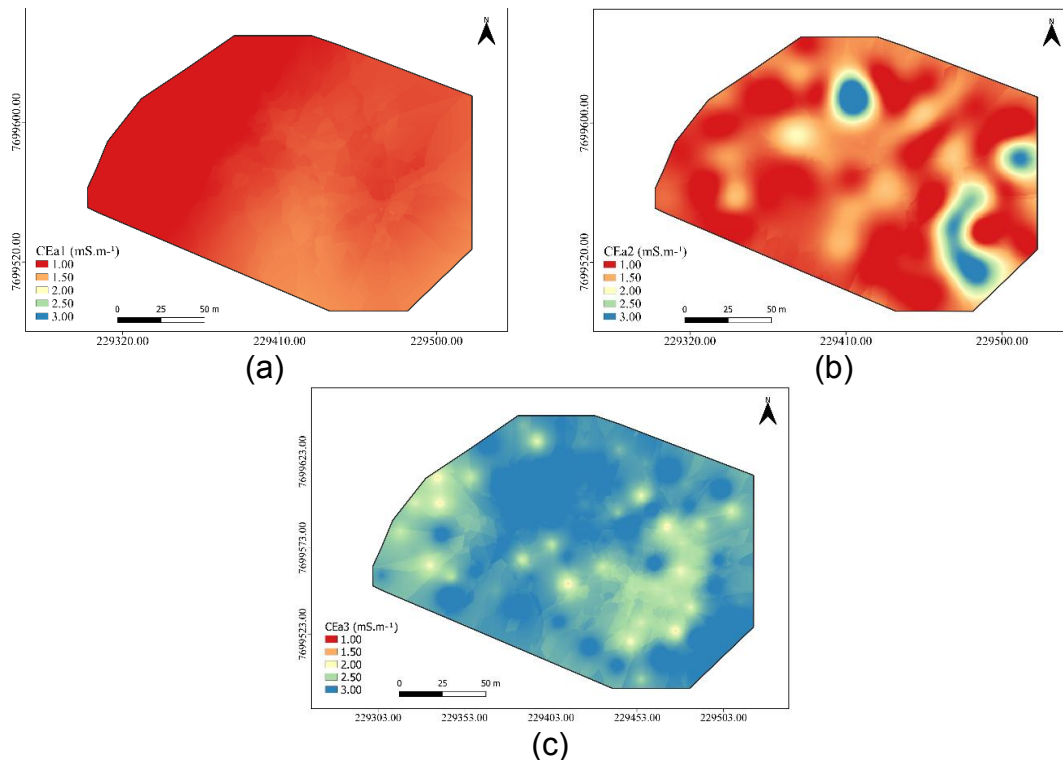


Figura 7 – Distribuição espacial de condutividade elétrica aparente em lavoura cultivada com café arábica. (a) CEa₁; (b) CEa₂ e (c) CEa₃.

Assim como a distribuição de CEa, a produtividade também não se apresentou de maneira uniforme, o que pode ser reflexo do manejo adotado que não segue um padrão bem definido em toda a área estudada. Grande parte da área apresentou produtividade próxima a 825 kg ha⁻¹ (13,75 sc ha⁻¹), sendo um valor bem abaixo do esperado quando compara-se com a média obtida no país na safra de 2020/2021, que foi de 21,9 sc/ha (CONAB, 2021), tendo pequenas manchas apresentando produtividades superiores (Figura 8).

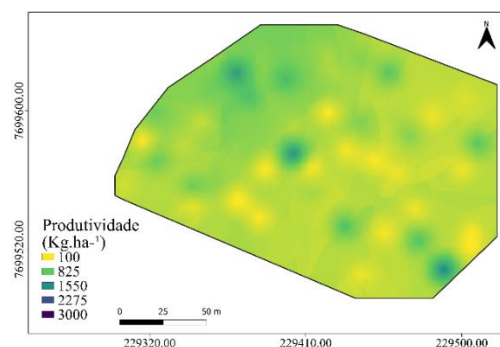


Figura 8 – Distribuição espacial da produtividade em lavoura cultivada com café arábica.

Os mapas interpolados da CEa foram relacionados com os dos atributos químicos do solo e a produtividade, bem como os dos índices de vegetação foram também relacionados com a produtividade, sendo os resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5. Na Tabela 4 são apresentados os valores de covariância entre as três leituras de CEa e os atributos de solo e planta. Tomando-se como base a classificação de Mingoti (2005), onde os valores são significativos acima de 0,40, observa-se que as variáveis, Al^{3+} , Argila, $H^{+}+Al^{3+}$, Na^{+} , T, V% e m% foram significativas, sendo apenas V% significativa positivamente.

Tabela 4 – Relatório de correlação entre mapas de atributos de solo e planta e condutividade elétrica aparente do solo.

Variável	CEa ₁	CEa ₂	CEa ₃
pH	0,29	0,05	-0,10
P	0,17	-0,01	-0,25
Na^{+}	-0,57	-0,12	0,17
K^{+}	-0,27	-0,14	0,04
Ca^{2+}	0,13	-0,19	-0,13
Mg^{2+}	0,23	-0,13	-0,12
Al^{3+}	-0,42	-0,09	0,02
$H^{+}+Al^{3+}$	-0,57	-0,01	-0,09
SB	0,17	-0,19	-0,16
T	-0,58	-0,26	-0,12
t	0,13	-0,19	-0,17
m%	-0,46	-0,10	-0,12
V%	0,62	0,04	-0,08
Alt	-0,86	-0,19	0,04
Prod	-0,43	0,20	0,08
Arg	-0,03	-0,25	-0,13

Negrito é significativo

Quanto ao relatório da correlação entre a produtividade das duas safras estudadas e as avaliações da CEa do solo, sendo significativa a primeira medição realizada em outubro de 2020 com a safra 2020/2021. Como a segunda

e terceira leitura de CEa foram realizadas em fevereiro de 2021 e em abril de 2022, respectivamente, não houve significância, provavelmente devido à época da análise.

Quanto aos índices de vegetação estudados e a produtividade obtida, apresentados na Tabela 5, o mesmo comportamento foi observado, sendo significativos os valores referentes à safra 2020/2021 quando relacionados aos índices obtidos no primeiro aerolevanteamento. Sendo importante observar que o primeiro aerolevanteamento foi efetuado em dezembro de 2020 e o segundo em fevereiro de 2021.

Tabela 5 – Relatório de correlação entre mapas índices de vegetação e produtividade.

Variável	Prod 2020/2021
NDVI ₁	0,50
NDVI ₂	0,18
NDRE ₁	0,52
NDRE ₂	-0,19
MPRI ₁	0,48
MPRI ₂	0,28

Prod 2020/2021 – Produtividade obtida na safra 2020/2021; NDVI - Índice de vegetação de diferença normalizada; NDRE - Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge; MPRI - Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado; 1 – resultado obtido na primeira avaliação; 2 – resultado obtido na segunda avaliação.

Neste caso as avaliações estão mais próximas da primeira safra do que da segunda safra, sendo a primeira safra de estudo caracterizada pelo primeiro ano fenológico da cultura, o período vegetativo. Neste período ocorre a formação das gemas foliares o que pode interferir na produção do ano seguinte, além disso é o período em que se encerra o parcelamento da adubação podendo influenciar tanto na condutividade elétrica do solo quanto no vigor vegetativo das plantas. Essas informações são muito importantes, pois podem ser úteis na previsão de safras.

2.4 CONCLUSÕES

As variáveis que determinam a produtividade dos cafeeiros arábica não se distribuem aleatoriamente, mas seguem um padrão de regionalização que precisa ser considerado para a recomendação de práticas de manejos.

Para que a CEa seja capaz de descrever a variação dos atributos de solo é necessário que as determinações de ambos sejam realizadas no mesmo período.

Para as condições deste estudo, a CEa pode ser utilizada para descrever a variação dos atributos: Na^+ , Al^{3+} , $\text{H}^+\text{+Al}^{3+}$, T, m%, V%, altitude e produtividade.

Os índices de vegetação mensurados no período correspondente à fase fenológica de granação dos frutos estão diretamente relacionados à produtividade dos cafeeiros.

2.5 REFERÊNCIAS

ADHIKARI, K. *et al.* Mapping Within-Field Soil Health Variations Using Apparent Electrical Conductivity, Topography, and Machine Learning. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1019, 2022.

ALEWELL, C. *et al.* Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 1–12, 2020.

AMARAL, L. R. *et al.* Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 15–28, 2015.

BABAR, M. A. *et al.* Spectral reflectance indices as a potential indirect selection criteria for wheat yield under irrigation. **Crop Science**, v. 46, n. 2, p. 578–588, 2006.

BADEWA, E. *et al.* Soil moisture mapping using multi-frequency and multi-coil electromagnetic induction sensors on managed podzols. **Agronomy**, v. 8, n. 10, p. 224, 2018.

BARBOSA, B. D. S. *et al.* Application of rgb images obtained by uav in coffee farming. **Remote Sensing**, v. 13, n. 12, p. 2397, 2021.

BOTTEGA, E. L. *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1–9, 2013.

BOTTEGA, E. L. *et al.* Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 134–142, 2015.

BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 711–722, 1993.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

CARVALHO, P. S. M. DE *et al.* Variabilidade Espacial Da Fertilidade De Um Solo Cultivado Com Cacaueiro. **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, v. 26, n. 2, p. 178–189, 2018.

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Integrating age in the detection and mapping of incongruous patches in coffee (*Coffea arabica*) plantations using multi-temporal Landsat 8 NDVI anomalies. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 57, p. 1–13, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento de safra brasileira – Safra Brasileira de Café: Quarto levantamento, dezembro 2021 – safra 2020/2021. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>>.

CORWIN, D. L.; HENDRICKS, J. M. H. Electrical Resistivity: Wenner Array. In: SSSA BOOK SERIES (Ed.). **Methods of Soil Analysis Part 4**. 5. ed. Madison, Wisconsin, USA: SSSA Book Series, 2002. p. 1282–1287.

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

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 135–152, 2005.

COSTA, M. M. *et al.* Efeito do teor de água na relação entre a condutividade elétrica aparente e atributos do solo. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395–401, 2014.

DADALTO, G. G.; FULLIN, E. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 4º aproximação**. Vitória, ES: SEEA/Incaper, 2001.

DE NEGREIROS NETO, J. V. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 193–204, 2014.

EKWUE, E. I.; BARTHOLOMEW, J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 2, p. 95–103, 2011.

ESTEVES, C. *et al.* Remote Sensing (NDVI) and Apparent Soil Electrical Conductivity (ECap) to Delineate Different Zones in a Vineyard. In: **Biology and Life Sciences Forum**. MDPI, 2021. p. 42.

GALVÃO, I. M.; SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Cokrigagem na estimativa da textura de um latossolo vermelho-amarelo. **Anais do SIAGRO**, p. 29, 2014.

GROHER, T. *et al.* Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 6, p. 1327–1350, 2020.

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

MESQUITA JÚNIOR, C. H. *et al.* Comportamento do índice Espectral NDVI em áreas cafeeiras de Três Pontas, MG, nos anos de 2008-2009. 2011.

MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos estatística multivariada: uma abordagem aplicada. In: **Análise de dados através de métodos**

estatística multivariada: uma abordagem aplicada. 2007. p. 295-295.

NADEEM, M. *et al.* Understanding the Adaptive Mechanisms of Plants to Enhance Phosphorus Use Efficiency on Podzolic Soils in Boreal Agroecosystems. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 337, 2022.

NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Relationship between coffee crop productivity and vegetation indexes derived from oli/landsat-8 sensor data with and without topographic correction. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 3, p. 387–394, 2018.

OLDONI, H.; BASSOI, L. H. Delineamento de zonas de manejo com base na condutividade elétrica aparente de solo arenoso. **Simpósio de geoestatística aplicada em ciências agrárias**, v. 4, 2015.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218–226, 2013.

PREZOTTI, L. C. *et al.* Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª aproximação. 2013.

RODRIGUES, G. C. *et al.* Caracterização espacial de índices de vegetação índice relativo de clorofila em áreas de produção cafés especiais no sul de Minas Gerais. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2019.

ROUSE JR, J. W. *et al.* **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.** 1974.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, DF. v. 3, 2013.

SILVA, F. M. DA *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, p. 401–407, 2007.

SILVA, F. M. DA *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência Agrotecnologia**, v. 32, p. 1231–241, 2008.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; BOTTEGA, E. L. Yield mapping of arabic coffee and

their relationship with plant nutritional status. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 13, n. 3, p. 556–564, 2013.

SILVA, S. A. *et al.* Apparent soil electrical conductivity in the delineation of management zones for cocoa cultivation. **Information Processing in Agriculture**, v. 9, n. 3, p. 443–455, 2022.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 150976, 2022.

TAUBINGER, L.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. Vegetation indices from active crop canopy sensor and their potential interference factors on sugarcane. In: **International Conference on Precision Agriculture. Indianapolis, Hyatt Regency**. 2012.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

TOGEIRO DE ALCKMIN, G. *et al.* Comparing methods to estimate perennial ryegrass biomass: canopy height and spectral vegetation indices. **Precision Agriculture**, v. 22, n. 1, p. 205–225, 2021.

VIEIRA, S. R. *et al.* Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1–75, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. 1. ed. New York: Academic Press, 1980.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. **Proc. Pecora.**, v. 17, n. 1, p. 1–11, 2008.

ZANZARINI, F. V. *et al.* Spatial correlation of the vegetation index (NDVI) of a Landsat/ETM+ images with soil attributes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.

CAPÍTULO III

Delineamento de zonas de manejo em lavoura de café com base em atributos do solo e condutividade elétrica aparente

RESUMO

Os locais de cultivos agrícolas manejados convencionalmente são tidos como homogêneos, e dessa forma, não é considerada a variabilidade existente nos campos de produção. Na Agricultura de Precisão (AP) a variabilidade espacial e temporal é levada em conta no momento da tomada de decisão e os locais que são considerados homogêneos, baseando-se em fatores de produção e limitação semelhantes, são denominados zonas de manejo (ZM). A divisão das grandes áreas produtivas em ZM, possibilita a adoção de manejos mais adequados, que consideram as reais necessidades de cada local, permitindo a otimização do uso de insumos. Diante do exposto, objetivou-se com esse trabalho realizar o delineamento de ZM em uma lavoura de café arábica utilizando-se de ferramentas de AP, a fim de implementar o manejo do local com a aplicação a taxas variadas de corretivos e fertilizantes. A pesquisa foi conduzida na safra de 2020/2021 no município de Alegre – ES, em uma lavoura de produção comercial de café arábica, Catuaí Amarelo, variedade IAC 62. A lavoura até o momento da pesquisa era manejada convencionalmente de acordo com resultados da análise de solo e não recebia irrigação. O local de estudo foi georreferenciado e com isso demarcou-se uma malha amostral irregular composta por 80 pontos. Antes da adubação, foram coletadas amostras de solo, na camada de 0 – 0,20m, nos locais correspondentes a todos os pontos da malha amostral, das quais foram realizadas análises físicas e químicas. Da mesma forma, foi feita a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Além disso, foram avaliados os índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), MPRI (Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado) e NDRE (Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge) e a produtividade obtida ao final da safra. Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas clássicas e geoestatística. Após essas

análises as ZM foram determinadas por meio do sistema KrigMe e a classificação do mapa foi feita por meio do algoritmo *Fuzzy K-means*. Para definição do número ideal de classes, utilizou-se os índices FPI (Índice de Performance Fuzzy) e MPE (Entropia da Participação Modificada) e com o índice Kappa foi determinado a concordância entre as classes de acordo com os dados de fertilidade do solo. Com isso, pode-se perceber que não é ideal a utilização de índices de vegetação para definição de ZM, uma vez que isso torna o processo trabalhoso e não gera grandes ganhos na precisão dos resultados, bastando apenas dados de CEa combinados com dados de altitude e argila do solo.

Palavras-chave: Cafeicultura; Agricultura de Precisão; Análise de solo; Geoestatística.

3.1 INTRODUÇÃO

Modelos convencionais de manejo agrícola consideram as áreas cultivadas como unidades homogêneas e, portanto, as submetem a práticas agronômicas uniformes. Nesses sistemas, as decisões são tomadas fundamentando-se em estimativas médias (HAGHVERDI *et al.*, 2015), seja para a disponibilidade de nutrientes em solução do solo, seja para a produtividade da cultura. Ao se ignorar a variabilidade existente nos campos de produção, elimina-se a possibilidade de adoção de manejos localizados, os quais são adotados na agricultura de precisão (GAVIOLI *et al.*, 2019).

Em agricultura de precisão (AP), os locais considerados homogêneos com base em atributos e fatores de limitação e produção semelhantes são chamados de zonas de manejo (ZM) (DOERGE, 1999; GAVIOLI *et al.*, 2019). Sendo uma das definições mais buscadas em AP atualmente (HUFKENS *et al.*, 2019), a divisão das áreas em ZM é influenciada por diversos fatores inter-relacionados (OHANA-LEVI *et al.*, 2019), como as propriedades dos solos que afetam a produtividade das culturas (PARK; VLEK, 2002; ALESSO *et al.*, 2012).

Entre as variáveis utilizadas para a delimitação de ZM estão altitude (JACINTHO *et al.*, 2017), fertilidade do solo (LEITE *et al.*, 2017), índices de vegetação (KUIAWSKI *et al.*, 2017), condutividade elétrica aparente (MACHADO *et al.*, 2006; FRAISSE; SUDDUTH; KITCHEN, 2001) resistência à penetração (GAVIOLI *et al.*, 2016) e textura (FARID *et al.*, 2016).

Como resultado do trabalho de divisão dos campos em áreas menores tem-se uma forma de manejar o solo e as lavouras, variando a aplicação de insumos conforme a necessidade de cada local (MULLA, 2013). Com isso, objetivou-se com esse trabalho delinear ZM para a cultura do café arábica, por meio de índices de vegetação e condutividade elétrica aparente do solo, para posterior manejo com corretivos e fertilizantes a taxas variadas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição do local de estudo e definição da malha amostral

O trabalho foi conduzido na safra de 2020/2021 em uma área de produção comercial de café arábica (*Coffea arabica* L.) variedade IAC 62, cultivada no

espaçamento de 1,5 m entre plantas e 2,5 m entre linhas. A lavoura está situada no distrito de Celina, município de Alegre, sul do Espírito Santo sob as coordenadas geográficas médias de 20°47'02" S e 41°35'57" W e altitude de 725 m (Figura 1). O local possui variação de altitude com relevo forte ondulado, a amplitude altimétrica é de 80 m e a declividade média é de 35,7%. As plantas foram recepdadas a cerca de oito anos para a renovação da lavoura. A lavoura não é irrigada e a adubação até então é feita pela média, de acordo com o recomendado pela interpretação da análise de solo. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média (SANTOS *et al.*, 2018). O clima do local, classificado como proposto por Köppen e Geiger (1928), é tropical úmido com temperatura média anual de 24 °C. A malha amostral utilizada no estudo foi irregular e composta de 80 pontos georreferenciados e enumerados (Figura 2). Para demarcação da malha amostral foi utilizado um GPS de precisão sub-centimétrica, as plantas da malha amostral foram identificadas com etiquetas metálicas enumeradas.

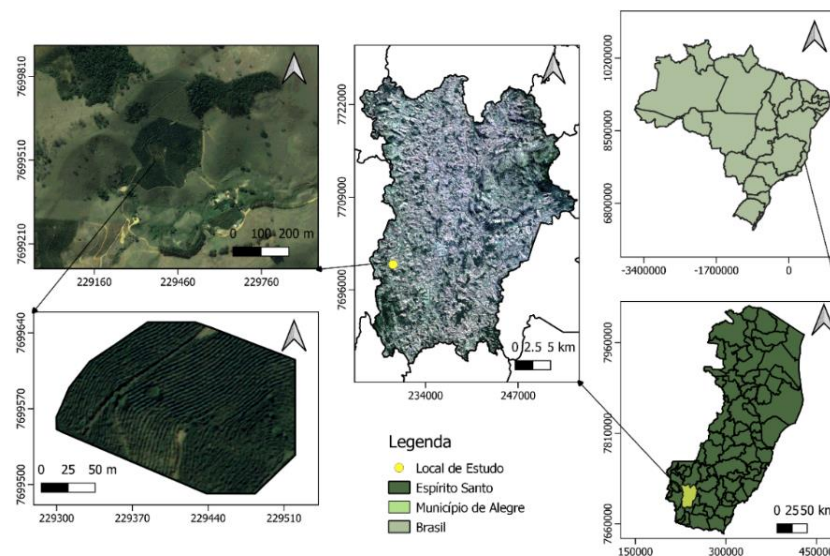


Figura 1 – Localização da área de estudo.

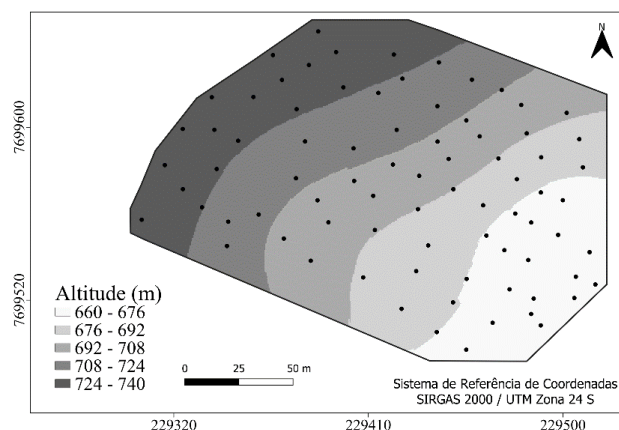


Figura 2 – Altitude e malha amostral na área de estudo.

3.2.2 Coleta de solo para análise

Antes da adubação, foram coletadas amostras de solo na camada de 0 – 0,20 m na projeção da copa das plantas. A coleta do solo foi realizada com uma sonda de aço inoxidável, para que fosse formada uma amostra composta foram coletadas três amostras simples correspondentes à planta marcada e às duas plantas vizinhas na mesma linha de plantio, após a coleta as amostras foram homogeneizadas em um balde plástico e colocadas em sacolas identificadas com a mesma marcação da planta. Após as coletas, as amostras foram previamente processadas e enviadas a laboratório comercial para análises físicas e químicas. Nas análises físicas foram determinadas as porcentagens de argila das amostras conforme metodologia apresentada por Teixeira *et al.* (2017). Nas análises químicas foram determinados os teores de fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), alumínio (Al^{3+}), acidez ativa (pH em água), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), calculados a soma de bases trocáveis (SB), capacidade efetiva de troca de cátions (CTC efetiva), capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC pH 7,0), índice de saturação por bases (V%) e o índice de saturação por Al^{3+} (m%), também de acordo com a metodologia apresentada por Teixeira *et al.* (2017).

3.2.3 Leitura de condutividade elétrica aparente do solo

No mês de outubro de 2020, após a primeira adubação, que foi feita conforme a recomendação de análise de solo, foram realizadas leituras de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) em todos os pontos da malha

amostral. Para esse levantamento foi utilizado o sensor portátil modelo LandMapper® ERM-01 de fabricação da Landviser (Houston - TX, U.S.A). Esse sensor é conectado a quatro eletrodos, espaçados igualmente que permite profundidade de medição igual ao espaçamento entre hastes utilizado, conforme a Matriz de Wenner cujo arranjo é apresentado na Figura 3 (CORWIN; HENDRICKS, 2002; CORWIN; LESCH, 2003). No caso deste trabalho foi utilizado o espaçamento de 0,20 m, por ser o mesmo adotado nas análises de solo.

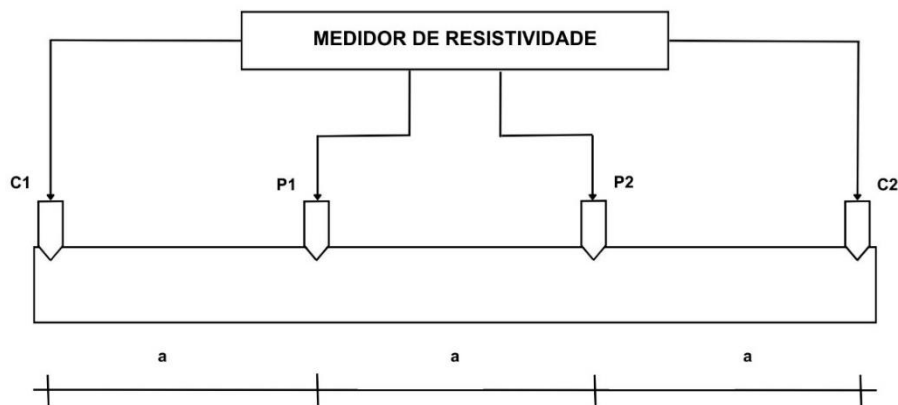


Figura 3 – Método de medida de resistividade elétrica com o arranjo de quatro eletrodos. Eletrodos de corrente C1 e C2; Eletrodos de potencial P1 e P2; a espaçamento entre os eletrodos. Fonte: Adaptado de Corwin e Lesch (2003).

O método baseado na configuração da Matriz de Wenner é fundamentado na resistividade, demonstrada na Equação 1.

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

onde:

ρ = Resistividade, Ohm m;

α = Espaçamento entre eletrodos, m;

ΔV = Diferença de potencial, V;

i = Corrente elétrica, A.

A condutividade elétrica aparente do solo é o inverso da resistividade (GIROTTI; SANTOS, 2002), que pode ser determinada pela Equação 2.

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

onde:

CEa = Condutividade elétrica aparente $mS\ m^{-1}$.

Conjuntamente com as avaliações de CEa , foram coletadas amostras de solo para a determinação de sua umidade. Ao todo foram coletadas 30 amostras ao longo da área com o intuito de obter maior representatividade no momento da leitura da CEa .

3.2.4 Realização de aerolevantamentos

No mesmo período da determinação da CEa , foram realizados aerolevantamentos por meio de um VANT com um sensor óptico multiespectral embarcado. Foi utilizado o sensor óptico multiespectral RedEdge MX equipado com lentes 47.9° HFOV 5.4 mm, que captura segmentos dos comprimentos de onda do espectro eletromagnético do visível (vermelho – R, verde – G e azul – B), do RedEdge e do infravermelho próximo (NIR). O sensor foi embarcado em um VANT multi-rotor modelo Phantom 4 Pro.

Para eliminar qualquer distorção que pudesse ocorrer nas imagens, o voo foi realizado de 11 às 13 horas e também foi feita a calibração radiométrica por meio de imagens que acompanham o sensor. As imagens obtidas foram processadas para que fosse formado um ortomosaico a partir de onze pontos de controle previamente demarcados e georreferenciados na área.

Por meio dos valores de refletância da copa dos cafeeiros o vigor vegetativo das plantas foi calculado utilizando os seguintes índices de vegetação:

MPRI – Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado (YANG; WILLIS; MUELLER, 2008), estimado pela Equação 1:

$$MPRI = \frac{Green - Red}{Green + Red} \quad (1)$$

onde:

$Green$ = valores de refletância na banda do verde, e;

Red = valores de reflectância na banda do vermelho.

NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (ROUSE *et al.*, 1974); estimado pela Equação 2:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

onde:

NIR = valores de reflectância na banda do infravermelho próximo, e;

Red = valores de reflectância na banda do vermelho

NDRE – Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge (BUSCHMANN; NAGEL, 1993) estimado pela Equação 3:

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge} \quad (3)$$

onde:

NIR = valores de reflectância na banda do infravermelho, e;

RedEdge = valores de reflectância na banda do RedEdge.

3.2.5 Análises estatísticas e geoestatísticas

Após a obtenção dos dados para as variáveis avaliadas, esses foram submetidos à análise exploratória para verificar a presença de valores discrepantes (*outliers*) e a interferência sobre as medidas de tendência central. Depois da retirada dos *outliers*, os dados foram submetidos à análise geoestatística a fim de para avaliar e quantificar o grau de dependência espacial das variáveis. As análises geoestatísticas foram realizadas para avaliar e quantificar o grau de dependência espacial das variáveis, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais clássicos de Matheron conforme Equação 4.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi + h)]^2 \quad (4)$$

onde:

$\gamma(h)$ = função variograma;

$N(t)$ = números de pares de pontos observados;

$Z(x_i)$ e $Z(x_i+t)$ = são os valores da variável regionalizada nos pontos x_i e x_i+t respectivamente.

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, foram determinados os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), contribuição (C_1) e alcance (a). Os valores de C_0 e C_0+C_1 foram escalonados dividindo-se os valores obtidos pela variância dos dados (VIEIRA *et al.*, 1983). O melhor modelo de variograma foi escolhido tendo como critério a menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R^2), foram testados os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear.

Para a análise da dependência espacial foi calculado o índice de dependência espacial (IDE), utilizando a relação [$C_0/(C_0+C_1)$] e os intervalos propostos por Cambardella *et al.* (1994), que considera a dependência espacial forte ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e fraca ($IDE \geq 75\%$).

3.2.6 Definição das zonas de manejo

As zonas de manejo foram definidas por meio do Sistema de Apoio à Decisão - KrigMe desenvolvido por Valente (2010). A classificação dos mapas foi feita com o algoritmo *Fuzzy K-means*. O padrão do software foi adotado para o número máximo de interações (100) e o número do coeficiente Fuzzy (2) e a padronização dos dados para obter-se média igual a zero e desvio padrão igual a um. Com os atributos estudados, foram definidas 14 combinações de ZM apresentadas na Tabela 1. Cada zona foi avaliada de duas a cinco classes.

Tabela 1 – Atributos a serem avaliados nas combinações de zonas de manejo.

Zonas de Manejo	
Alt	Alt_Arg_C Ea
Arg	Alt_Arg_NDVI
NDVI	Alt_Arg_NDRE
NDRE	Alt_Arg_MPRI
MPRI	Alt_Arg_C Ea_NDVI
C Ea	Alt_Arg_C Ea_NDRE
Alt_Arg	Alt_Arg_C Ea_MPRI

Alt – Altitude; Arg – Argila; C Ea – Condutividade elétrica aparente do solo; NDVI - Índice de vegetação de diferença normalizada; NDRE - Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge; MPRI - Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado.

Para a definição do número ideal de classes das ZM foram utilizados os índices FPI (Índice de Performance Fuzzy) e MPE (Entropia da Participação Modificada), sendo obtido o número ótimo de classes quando ambos são mínimos (SONG *et al.*, 2009). A fim de definir o melhor número de ZM, os dados de fertilidade do solo foram especializados e posteriormente relacionados com os mapas de ZM utilizando o índice Kappa como critério de concordância entre classes.

A escolha do índice Kappa se deu pois, conforme (KITCHEN *et al.*, 2005), esse método demonstra a aceitação entre as classificações, sendo a maior concordância obtida com o maior valor do índice. Utilizou-se a metodologia proposta por Congalton e Mead (1986) e utilizada por Valente *et al.* (2012) e Alves *et al.* (2013), considerando-se os seguintes intervalos: $Kappa < 0$ a concordância é péssima e não significativa; $0 \leq kapp < 0,20$, a concordância é significativa, porém ruim; $0,20 \leq kapp < 0,40$, concordância significativa, porém razoável, e; $kapp \geq 0,40$, concordância significativa e boa.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o delineamento de ZM foram utilizadas como variáveis de entrada a altitude, o teor de argila no solo, a CEa e os índices de vegetação NDVI, NDRE e MPRI. A escolha de tais variáveis ocorreu devido à estabilidade temporal que apresentam (altitude e teor de argila), à facilidade de aquisição de dados e obtenção de resultados de forma rápida (CEa) e à possibilidade de relacioná-los ao vigor vegetativo do cafeeiro (índices de vegetação).

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises geoestatísticas para os atributos estudados. Percebe-se que houve dependência espacial para todos os atributos analisados, sendo forte para Alt, Arg e NDRE; e moderada para NDVI, MPRI e CEa, possibilitando estabelecer modelos teóricos de variogramas que mais se ajustassem aos modelos experimentais. Como esperado, devido à continuidade espacial, o maior alcance foi o da variável altitude, atingindo 267 m, isso indica maior homogeneidade na distribuição da variável ao longo da área estudada.

Tabela 2 – Modelos e parâmetros dos variogramas médios escalonados ajustados aos atributos de solo e planta do cafeeiro.

Atributo	Modelo	C ₀	C ₀ +C	a (m)	IDE (%)	SE Pred
Alt	Gau	0,00	3,51	267,00	0,04	0,91
Arg	Exp	0,00	1,14	91,00	0,04	3,44
NDVI	Gau	0,54	1,11	62,00	48,73	0,01
NDRE	Exp	0,12	1,04	49,00	11,72	0,02
MPRI	Gau	0,56	1,16	77,00	48,33	0,04
CEa	Gau	0,62	1,29	168,00	48,73	0,25

C₀ - efeito pepita escalonado; C₀+C₁ - patamar escalonado; a - alcance; IDE - Índice de Dependência Espacial; SE Pred – erro padrão da estimativa; Gau – Gaussiano; Exp – Exponencial; Alt – Altitude; Arg – Argila; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo; NDVI - Índice de vegetação de diferença normalizada; NDRE - Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge; MPRI - Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado.

Analisando os resultados da Tabela 3, que apresenta os índices FPI e MPE para cada classe de cada zona de manejo, é possível perceber que cinco combinações de zonas minimizaram os índices com duas classes (Arg, CEa, Alt_Arg_C Ea, Alt_Arg_C Ea_NDVI e Alt_Arg_C Ea_MPRI); duas combinações minimizaram os índices com três classes (Alt_Arg_NDVI e Alt_Arg_NDRE); uma combinação minimizou os índices com quatro classes (Alt_Arg_MPRI) e uma combinação minimizou os índices com cinco classes (NDRE). A partir desses resultados foram definidos mapas de ZM.

Tabela 3 – Índice FPI e MPE para cada classe de cada zona de manejo.

Zonas de Manejo	Índices	Número de classes			
		5	4	3	2
Alt	FPI	0,0636	0,0627	0,0643	0,0619
	MPE	0,0518	0,0556	0,0641	0,0734
Arg	FPI	0,0581	0,0602	0,0563	0,0326
	MPE	0,0480	0,0544	0,0568	0,0398
NDVI	FPI	0,0670	0,0657	0,0665	0,0760
	MPE	0,0545	0,0592	0,0666	0,0885
NDRE	FPI	0,0626	0,0666	0,0630	0,0779
	MPE	0,0513	0,0591	0,0639	0,0908

Zonas de Manejo	Índices	Número de classes			
		5	4	3	2
MPRI	FPI	0,0669	0,0635	0,0641	0,0674
	MPE	0,0787	0,0636	0,0568	0,0552
CEa	FPI	0,0568	0,0499	0,0486	0,0349
	MPE	0,0468	0,0445	0,0492	0,0420
Alt_Arg	FPI	0,0745	0,0945	0,0617	0,0378
	MPE	0,0631	0,0843	0,0641	0,0496
Alt_Arg_CEa	FPI	0,0780	0,0929	0,0567	0,0934
	MPE	0,0685	0,0868	0,0587	0,1152
Alt_Arg_NDVI	FPI	0,1029	0,1116	0,0837	0,1923
	MPE	0,0903	0,1052	0,0893	0,2217
Alt_Arg_NDRE	FPI	0,1209	0,1156	0,0656	0,1179
	MPE	0,1048	0,1104	0,0709	0,1452
Alt_Arg_MPRI	FPI	0,0955	0,0798	0,0867	0,166
	MPE	0,084	0,0772	0,0928	0,2005
Alt_Arg_CEa_NDVI	FPI	0,0953	0,1099	0,078	0,092
	MPE	0,0855	0,1049	0,0805	0,1172
Alt_Arg_CEa_NDRE	FPI	0,1057	0,0959	0,0698	0,0823
	MPE	0,0956	0,0946	0,0727	0,1052
Alt_Arg_CEa_MPRI	FPI	0,0823	0,1029	0,0755	0,0806
	MPE	0,0735	0,0959	0,0797	0,1063

Alt – Altitude; Arg – Argila; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo; FPI - Índice de Performance Fuzzy; MPE - Entropia da Participação Modificada; NDRE - Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge; MPRI - Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado.

Na Figura 4 são apresentadas as ZM que foram minimizadas com duas classes a partir do mapa de Argila (Arg); CEa; Altitude, Argila e CEa (Alt_Arg_CEa); Altitude, Argila, CEa e NDVI (Alt_Arg_CEa_NDVI) e dos mapas de Altitude, Argila, CEa e MPRI (Alt_Arg_CEa_MPRI).

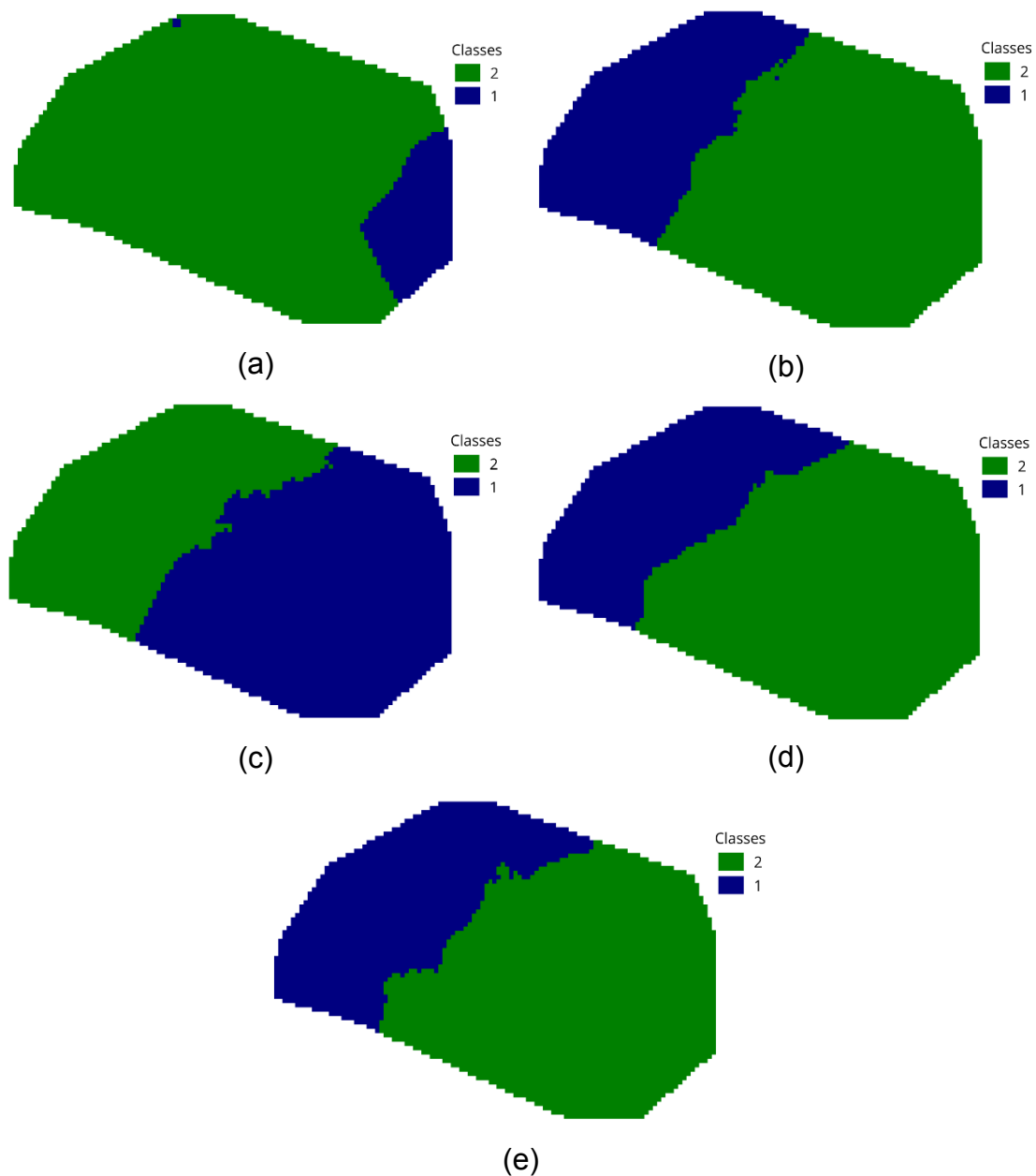


Figura 4 – Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de (a) Arg, (b) CEa, (c) Alt_Arg_CEq, (d) Alt_Arg_CEq_NDVI e (e) Alt_Arg_CEq_MPRI em duas classes.

Apesar dos resultados encontrados por Sobjak (2012), onde os índices FPI e MPE foram minimizados para duas classes apenas para variáveis individuais, neste trabalho, a minimização também aconteceu para combinação entre variáveis. Este fato se justifica, pois nas combinações, as variáveis envolvidas, com exceção da CEa, apresentaram elevada continuidade espacial o que justifica os resultados.

Na Figura 5 são apresentadas as ZM que foram minimizadas com três classes a partir dos mapas de Altitude, Argila e NDVI (Alt_Arg_NDVI) e Altitude, Argila e NDRE (Alt_Arg_NDRE). Em pesquisas semelhantes diferentes autores (LI *et al.*, 2008; MOLIN; DE CASTRO, 2008; MORARI; CASTRIGNANÒ; PAGLIARIN, 2009; XIN-ZHONG *et al.*, 2009) definiram como três o número ideal de classes para o estabelecimento de ZM. Percebe-se que, embora três também seja um número baixo de classes para dividir-se a área de cultivo, já começam a aparecer descontinuidades nos mapas, dificultando a adoção de manejos localizados.

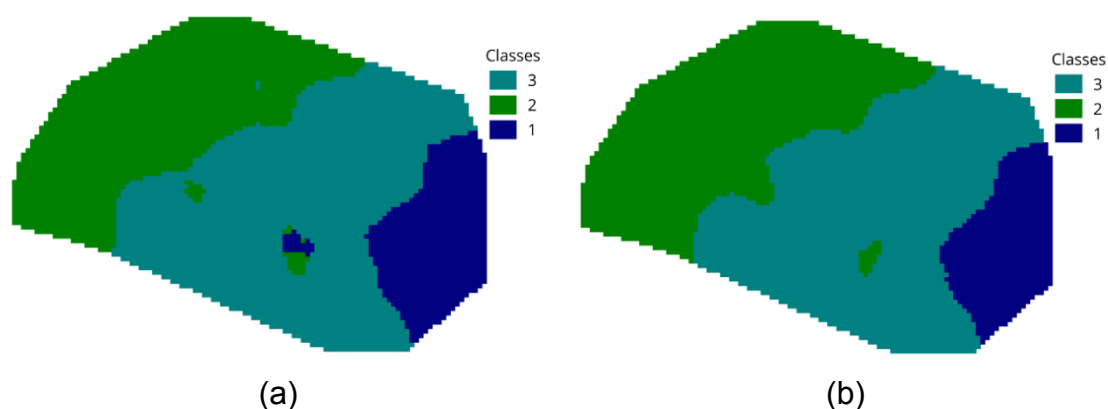


Figura 5 – Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de (a) Alt_Arg_NDVI e (b) Alt_Arg_NDRE em três classes.

Na Figura 6 é apresentada a zona de manejo que foi minimizada com quatro classes a partir dos mapas de Altitude, Argila e MPRI (Alt_Arg_MPRI). Na combinação em questão, percebe-se ainda maior descontinuidade dentro da área de estudo. Além da descontinuidade, a divisão em um maior número de classes limita a utilização prática das ZM, principalmente em áreas menores. Essa dificuldade é agravada em áreas de relevo íngreme, como encontrado nessa pesquisa, onde os tratamentos culturais são estritamente manuais.



Figura 6 – Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de Alt_Arg_MPRI em quatro classes.

Na Figura 7 é apresentada a zona de manejo que foi minimizada com cinco classes a partir do mapa de NDRE. As variáveis de entrada influenciam consideravelmente no número de classes a serem divididas as ZM. Diante dessa afirmação é possível inferir que as combinações com variáveis com maior variabilidade espacial tendem a minimizar os índices em um número maior de classes e/ou produzir maior descontinuidade entre classes. Como o mapa de NDRE não apresentou forte continuidade espacial, a zona de manejo gerada a partir dele manifesta o mesmo comportamento, por isso a grande descontinuidade no mapa de zona de manejo e a minimização com o maior número de classes.

Neste mapa pode-se perceber a impossibilidade de adoção de um número maior de classes dentro da zona de manejo, por essas classes serem muito pequenas isso torna a adoção de recomendação de corretivos e fertilizantes em área não mecanizada inviável.

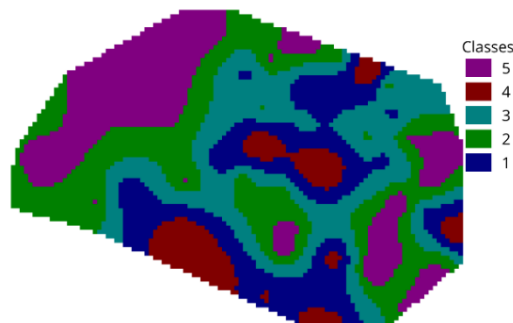


Figura 7 – Zonas de manejo para recomendação de corretivos e fertilizantes definidas a partir da combinação dos mapas de variabilidade espacial de NDRE em cinco classes.

Para identificar quais das combinações para o delineamento de ZM melhor descrevem a distribuição espacial dos atributos de solo, foram realizadas análises adicionais de concordância por meio do índice Kappa, apresentadas na Tabela 4. Durante a comparação das ZM as variáveis de entrada mais importantes foram definidas de acordo com (FRIDGEN *et al.*, 2004). Assim, as combinações Arg, CEa, Alt_Arg_C Ea, Alt_Arg_C Ea_NDVI e Alt_Arg_C Ea_MPRI foram analisadas em relação às propriedades do solo, classificadas em duas classes, sendo utilizado o critério de Congalton e Mead (1986) que estabelece: $Kappa < 0$ a concordância é péssima e não significativa; $0 \leq kappa < 0,20$, a concordância é significativa porém ruim; $0,20 \leq kappa \leq 0,40$, concordância significativa porém razoável, e; $Kappa \geq 0,41$, concordância significativa e boa.

Tabela 4 – Coeficiente Kappa para as classificações das propriedades químicas do solo com as zonas de manejo em duas classes.

Combinação	Propriedades químicas do solo							
	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH	SB	V%	T
Arg	-0,10	0,09	0,06	0,10	0,02	0,09	0,11	0,16
CEa	0,04	0,08	-0,02	0,07	0,01	-0,03	0,42	0,47
Alt_Arg_C Ea	0,18	0,04	0,08	0,15	0,17	0,06	0,47	0,41
Alt_Arg_C Ea_NDVI	0,17	0,05	0,05	0,15	0,20	0,04	0,45	0,40
Alt_Arg_C Ea_NDRE	0,19	0,05	0,05	0,14	0,21	0,04	0,46	0,41
Alt_Arg_C Ea_MPRI	0,16	0,03	0,05	0,15	0,20	0,04	0,44	0,37

Alt – altitude (m); Arg – argila; CEa – Condutividade elétrica aparente do solo $mS\ m^{-1}$, NDVI - Entropia da Participação Modificada; NDRE - Índice de vegetação da diferença normalizada do RedEdge; MPRI - Índice de Reflectância Fotoquímico Modificado, P – $mg\ dm^{-3}$; K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SB, CTC pH 7,0 (T) – $cmolc\ dm^3$; V – saturação por bases (%); Solo analisado quimicamente conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) - pH H₂O (KCl 1 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹).

Para as zonas delineadas com apenas uma variável de entrada, observa-se que os valores de concordância foram menores do que os valores observados para as zonas delineadas a partir da combinação de variáveis. Para a argila, individualmente (Arg), todas as concordâncias foram significativas, porém ruins, exceto o valor de P com valores não significativos. Para a CEa, individualmente, embora V% e T com concordâncias significativas e boas, as outras propriedades

apresentaram concordância significativa e ruim (P, K, Mg e pH) ou não significativa (Ca e SB).

Para a combinação Alt_Arg_CEA, as concordâncias foram significativas com todos os atributos, porém ruins com P, K, Ca, Mg, pH e SB, e boa com V% e T. Apesar da concordância ruim observada com a maior parte dos atributos somente o K, Ca e SB estão próximos ao limite inferior, sendo os demais muito próximos ao limite superior. Comportamento semelhante foi observado para as combinações envolvendo mais de uma variável.

Considerando o valor ótimo de número de classes igual a dois, as combinações Alt_Arg_CEA, Alt_Arg_CEA_NDVI, Alt_Arg_CEA_NDRE e Alt_Arg_CEA_MPRI foram as que apresentaram melhores resultados na classificação pelo índice Kappa, principalmente no que se refere a V% e T. Corroborando com resultados encontrados por Kitchen *et al.* (2005), a utilização de diferentes variáveis em conjunto apresenta resultados mais satisfatórios na classificação do solo para recomendação de corretivos e fertilizantes.

Os mapas de V% e T foram bem classificados pelo coeficiente Kappa nas ZM com altitude e CEA como variáveis individualizadas e nas ZM onde utilizou-se a combinação Alt_Arg_CEA. Também foram observados valores de Kappa aceitáveis na combinação entre Alt_Arg_CEA e os índices de vegetação analisados, porém a combinação dos atributos altitude, argila e CEA já é eficiente para a definição de ZM, não se justificando o uso de índices de vegetação, pois o uso desses índices não apresentou ganhos significativos nos valores de coeficiente Kappa.

Além da ausência de ganhos significativos, a inclusão dos índices de vegetação no delineamento das ZM torna o processo oneroso do ponto de vista financeiro e operacional, sendo o investimento não justificável ao passo que a sua inclusão não aumenta a qualidade da análise.

A boa concordância das ZM delineadas com os mapas de V% e T é um fator importante mostrado nesse estudo, uma vez que essas variáveis são parâmetros importantes na recomendação de calagem (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Além disso, os valores de argila e fósforo são critérios para a recomendação de fertilizantes, justificando-se mais uma vez a utilização da combinação Alt_Arg_CEA com duas classes na definição de ZM para a cultura estudada.

A minimização dos índices com duas classes é um fator importante, pois um menor número de classes no delineamento de ZM faz com que a aplicação dos manejos localizados seja viável operacionalmente, dada a maior facilidade da divisão das áreas de produção (SANTOS *et al.*, 2003).

Além disso, considerando que o maior número de combinações também foi minimizado com duas classes (Alt_Arg_CEA_NDVI e Alt_Arg_CEA_MPRI), e apenas para essas houve continuidade, pode-se inferir que este é, matematicamente, o número de classes ideal para a geração de ZM a partir das variáveis de entrada utilizadas.

É preferível que sejam adotadas menos classes na delimitação de ZM, pois classes menores são difíceis de serem manejadas por conta de limitações técnicas (TISSEYRE; MCBRATNEY, 2008). Como citado anteriormente, considerando que até mesmo com o maior número de combinações foi minimizado com duas classes, com base no aspecto matemático, pode-se inferir que neste estudo, recomenda-se a utilização de duas classes para definir as ZM. Além do mais, quando se começa a dividir a área de estudo em áreas menores ocorre diminuição da continuidade dessas classes, o que pode tornar agronomicamente inviável a adoção do manejo ideal dentro dessas classes.

Dessa forma, percebe-se que as classes definidas com as ZM precisam de manejo individualizado, a fim de melhorar a qualidade e a produtividade da cultura em questão. Espera-se que a aplicação específica de corretivos e fertilizantes produza benefícios econômicos ao agricultor e também melhorias ambientais (AGGELOPOULOU *et al.*, 2013).

3.4 CONCLUSÕES

A utilização de índices de vegetação para o delineamento de ZM para o café arábica não se justifica, uma vez que apenas a CEA é capaz de definir as classes e o uso de índices de vegetação tornam o processo oneroso e aumenta a necessidade de tempo para o processamento de dados.

Os índices de vegetação, apesar de permitirem o delineamento de ZM válidas, matemática e agronomicamente, não garantem ganhos significativos para a divisão do campo de produção em classes de manejo.

Para o manejo localizado dos cafeeiros é necessária a utilização da condutividade em combinação com altitude e argila.

3.5 REFERÊNCIAS

AGGELOPOOULOU, K. *et al.* Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 90, p. 119–130, 2013.

ALESSO, C. A. *et al.* Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana Santafesina. **Ciencia del Suelo**, v. 30, n. 1, p. 85–93, 2012.

ALVES, S. M. DE F. *et al.* Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 104–114, 2013.

BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 711–722, 1993.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

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

CORWIN, D. L.; HENDRICKS, J. M. H. Electrical Resistivity: Wenner Array. In: SSSA BOOK SERIES (Ed.). . **Methods of Soil Analysis Part 4**. 5. ed. Madison, Wisconsin, USA: SSSA Book Series, 2002. p. 1282–1287.

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

DOERGE, T. A. Defineing management zones for precision farming. **Crop**

Insights, v. 8, n. 21, p. 1–5, 1999.

FARID, H. U. *et al.* Delineating site-specific management zones for precision agriculture. **Journal of Agricultural Science**, v. 154, n. 2, p. 273–286, 2016.

FRAISSE, C. W.; SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Delineation of site-specific management zones by Unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 1, p. 155–166, 2001.

FRIDGEN, J. J. *et al.* Managementzone analyst (MZA): software for subfieldmanagementzone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 100–108, 2004.

GAVIOLI, A. *et al.* Optimization of management zone delineation by using spatial principal components. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 302–310, 2016.

GAVIOLI, A. *et al.* Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods. **Biosystems Engineering**, v. 181, p. 86–102, 2019.

HAGHVERDI, A. *et al.* Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 117, p. 154–167, 2015.

HUFKENS, K. *et al.* Monitoring crop phenology using a smartphone based near-surface remote sensing approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, n. 15, p. 327–337, 2019.

JACINTHO, J. L. *et al.* Management zones in coffee cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 94–99, 2017.

KITCHEN, N. R. *et al.* Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 285–308, 2005.

KUIAWSKI, A. C. M. B. *et al.* Vegetation indexes and delineation of management zones for soybean. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 2, p. 168–177, 2017.

LEITE, C. W. *et al.* Management zones for phosphorus and potassium levels in the soil of irrigated rice yield. **Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p. 164–172, 2017.

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, n. 1, p. 68–76, 2008.

MACHADO, P. L. O. D. A. *et al.* Electrical conductivity mapping in relation to clay of a Ferralsol under no tillage system. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023–1031, 2006.

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

MORARI, F.; CASTRIGNANÒ, A.; PAGLIARIN, C. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 97–107, 2009.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013.

OHANA-LEVI, N. *et al.* A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, n. May, p. 719–731, 2019.

PARK, S. J.; VLEK, P. L. G. Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: A comparison of three adaptive techniques. **Geoderma**, v. 109, n. 1–2, p. 117–140, 2002.

ROUSE, J. W. *et al.* **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. 1974.

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.

SOBJAK, R. **Seleção de variáveis para definição de unidades de manejo através da lógica fuzzy c-means**. 2012.

SONG, X. *et al.* The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 471–487, 2009.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

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

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010.

VALENTE, D. S. M. *et al.* Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173–179, 2012.

VIEIRA, S. R. *et al.* Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1–75, 1983.

XIN-ZHONG, W. *et al.* Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 2, p. 168–175, 2009.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. **Proc. Pecora.**, v. 17, n. 1, p. 1–11, 2008.

CAPÍTULO IV

Determinação da qualidade e produtividade do café arábica conduzido em zonas de manejo

RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) contribuiu muito com o avanço das práticas agrícolas no país. Essa prática considera que as áreas de cultivo não são uniformes e por isso a variabilidade existente nelas deve ser manejada de forma que haja eficiência no uso dos recursos aplicados. A divisão desses locais em zonas de manejo (ZM) possibilita que a gestão das áreas seja feita de forma mais eficiente, principalmente no que se refere à aplicação de insumos. Além disso, também é possível identificar regiões que tem potencial de gerar produtos finais com bons níveis de produtividades e potencial qualidade. Diante disso, o presente estudo teve objetivo de comparar a qualidade de a produtividade em uma área de produção de café arábica dividida em zonas de manejo em dois períodos. Para essa pesquisa utilizou-se uma área de produção comercial de café arábica, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62. A área possui está localizada em Alegre – ES, possui 2,9 ha e o espaçamento é de 2,5 m entre linhas e 1,5 m entre plantas. A lavoura foi georreferenciada e nela foi demarcada uma malha amostral de 80 pontos enumerados, para que todas as análises fossem feitas nos mesmos locais. Ao final de cada safra foram coletadas amostras de solo na camada de 0 – 0,20m, em cada zona de manejo definida, com o objetivo de realizar análises físicas e químicas de solo. Na ocasião da colheita, os frutos de cada ponto foram colhidos e processados para que, com a área correspondente a cada planta, obtivesse a produtividade da cultura. Também coletaram-se amostras de frutos maduros das quais realizaram-se análises de qualidade da bebida por provadores especializados. Após sua obtenção, os dados foram submetidos a análises estatísticas e geoestatísticas.

Observou-se que comparando as duas safras houve diminuição dos teores de nutrientes, o que deve-se à extração pelas plantas em um ano de alta produção. Entre os fatores que interferiram na diminuição de nutrientes do solo, está a adubação realizada em quantidades inferiores às recomendadas. Em relação à qualidade da bebida, verificou-se que todas as estratificações apresentaram potencial para produzir bebida de qualidade em ambas as safras estudadas, permitindo ao produtor o investimento no mercado de cafés especiais.

Palavras-chave: Cafeicultura; Zoneamento; Agricultura de Precisão; *Coffea arabica*.

4.1 INTRODUÇÃO

Embora só tenha sido praticada a partir da década de 1990 no Brasil, a Agricultura de Precisão (AP) é uma das dez principais revoluções agrícolas (CROOKSTON, 2006). Como uma forma de manejar os plantios, a AP envolve uma melhor gestão de insumos, como o caso de fertilizantes que passam a ser aplicados no lugar e período certos (MULLA, 2013).

O manejo de modo uniforme de locais que possuam variabilidade espacial é ineficiente em relação ao uso de água e nutrientes (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004; MCBRATNEY; BRETT; ANCEV, 2005). Enquanto grandes cultivos agrícolas, manejados da forma convencional recebem doses uniformes de insumos, com a AP ocorre a divisão dessas áreas em zonas de manejo (MULLA, 2013), que são sub-regiões homogêneas dentro de um campo, que recebem insumos de acordo com suas necessidades específicas (KHOSLA *et al.*, 2008; MILNE *et al.*, 2012).

A AP pode, além de auxiliar na otimização dos insumos, identificar locais com alto potencial de produtividade e qualidade. Isso é de fundamental importância em setores como o de cafés especiais, outro ramo que vem crescendo por conta da alta concorrência, onde os produtores estão preocupados também com a qualidade do café produzido (VALENTE *et al.*, 2012).

Além da produtividade das lavouras cafeeiras, outro ponto importante é a qualidade do produto obtido. Dessa forma, além de ser o objetivo final de quase todos os cultivos agrícolas, a produtividade juntamente com informações de fertilidade do solo e modelos digitais de elevação tem sido utilizados para definir zonas de manejo (FLEMING; HEERMANN; WESTFALL, 2004). Diante do avanço da aplicação de tecnologias de Agricultura de Precisão, faz-se importante conhecer a viabilidade e as modificações que esse tipo de manejo acarreta nas áreas de cultivo.

Diante do exposto, a pesquisa foi realizada com o objetivo de comparar a qualidade e a produtividade de uma lavoura cafeeira dividida em zonas de manejo em dois momentos.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição do local de realização da pesquisa

O experimento foi realizado em uma lavoura comercial cultivada com café arábica (*Coffea arabica* L.), cultivar Catuaí Amarelo IAC 62, a escolha do local deu-se por conta de representar as características da região onde o trabalho foi realizado. A lavoura possui 8 anos de idade e está implantada em uma área de 2,9 ha. O experimento foi executado nas safras de 2020/2021 e 2021/2022. A cultura foi plantada com um arranjo espacial de plantio de 2,5 m entre linhas, 1,5 m entre plantas. O campo de estudo é localizado no município de Alegre, Estado do Espírito Santo, Brasil, sob as coordenadas médias de 20°47'02''S e 41°35'57''W (Figura 1). Para esta pesquisa foram amostradas 80 plantas distribuídas em uma grade irregular que foi enumerada e georreferenciada para que as análises fossem feitas nos mesmos locais mesmo que em diferentes épocas de amostragem.

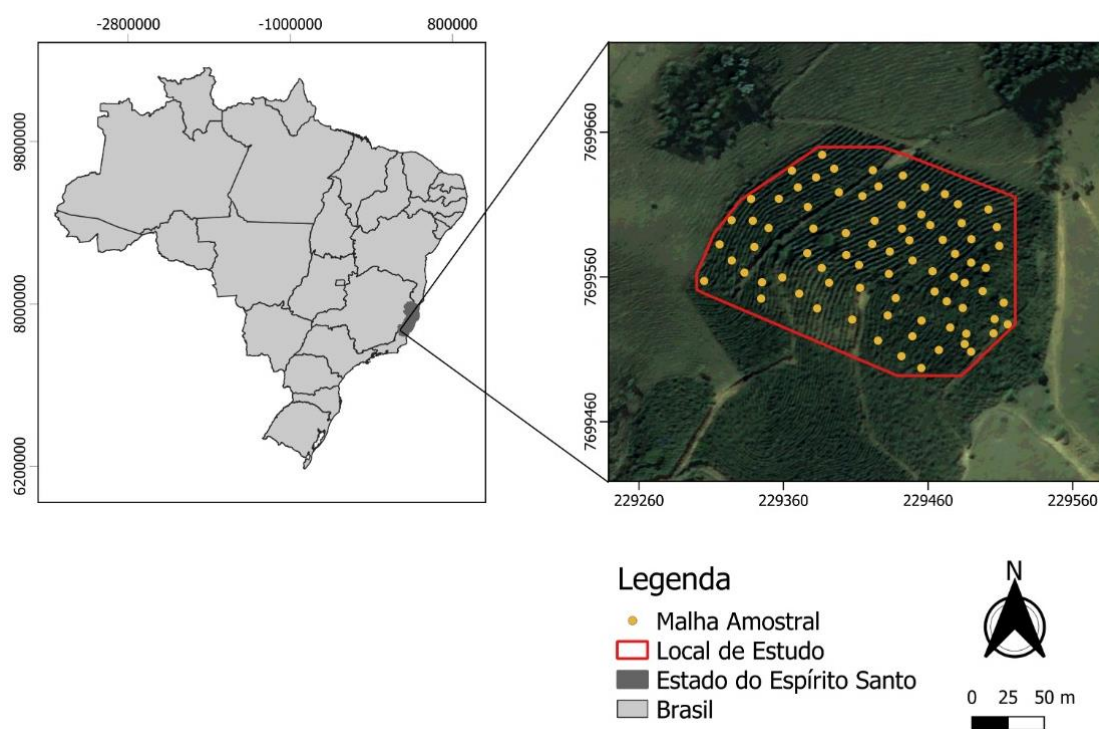


Figura 1 – Localização geográfica e malha amostral na área de estudo.

Foram delineadas zonas de manejo na lavoura em questão a partir da combinação de mapas de altitude, porcentagem de argila e condutividade

elétrica aparente do solo (CEa) na safra de 2020/2021. Deste modo a área foi dividida em duas classes para a adoção de manejos localizados, orientados pelos dados de fertilidade do solo. Além do delineamento das zonas de manejo (Figura 2a), a lavoura também foi dividida em talhões a partir dos carregadores que já existiam na área (Figura 2b), que foram definidos pelo próprio produtor antes da realização deste trabalho.

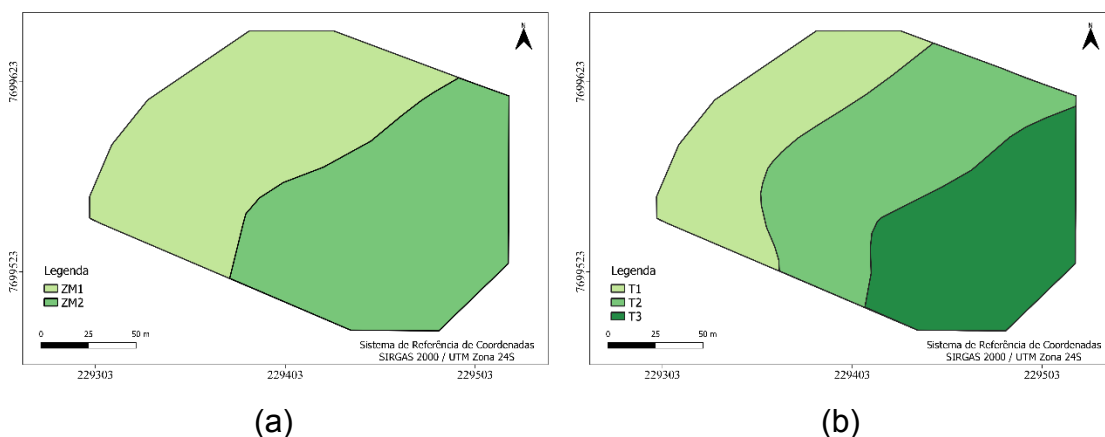


Figura 2 – Esquemática da divisão da área estudada em zonas de manejo (a) e em talhões (b). ZM1 – Classe 1; ZM2 – Classe 2; T1 – Talhão 1; T2 – Talhão 2; T3 – Talhão 3.

Na área estudada foram realizadas análises químicas do solo e de acordo com os resultados foram feitas adubações considerando a recomendação dada, de produtividade e qualidade da bebida nas duas safras, com a finalidade de estudar o manejo da lavoura dentro das zonas de manejo e também nos talhões já definidos previamente.

4.2.2 Amostragem do solo

Ao final de cada safra foram coletadas amostras de solo em 40 pontos em toda a área, sendo 20 pontos em cada classe de cada zona de manejo, na camada de 0 – 20 m, na projeção da copa das plantas utilizando-se uma sonda de aço inoxidável. Para cada ponto para produzir uma amostra composta foram coletadas três amostras simples, sendo essa o resultado da amostra da planta identificada e das duas plantas vizinhas, uma de cada lado da mesma linha de

plântio, objetivando-se formar uma amostra composta representativa daquele ponto.

Dessas amostras foram analisados os atributos: fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), alumínio (Al^{3+}), acidez ativa (pH em água), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), calculados a soma de bases trocáveis (SB), capacidade efetiva de troca de cátions (t), capacidade de troca de cátions a pH 7 (T), índice de saturação por bases (V%), índice de saturação por Al (m%), matéria orgânica (M.O.) e fósforo remanescente (Prem), conforme a metodologia apresentada por Teixeira *et al.* (2017).

4.2.3 Coleta e beneficiamento dos frutos

Na ocasião da colheita de ambas as safras, quando a maior parte dos frutos atingiram o estágio de maturação completa, verificado por meio de inspeção visual, a produção das 80 plantas foi colhida por meio de derriça manual, sobre panos e peneiras, e pesada. Da produção de cada planta retirou-se uma amostra simples que foi colocada em uma sacola telada de malha fina, para ser transportada até o laboratório para beneficiamento. Cada amostra composta foi formada pela soma de amostras simples até o peso de aproximadamente 1 kg.

Para a primeira safra foram coletadas três amostras compostas para cada talhão (as zonas de manejo ainda não tinham sido definidas), para os cálculos de rendimento e duas amostras para análise de qualidade da bebida. Já para a segunda safra, já com as zonas de manejo delineadas, foram coletadas três amostras para cálculo de produtividade. A produtividade e a qualidade foram determinadas a nível de talhão (3 talhões) e zona de manejo (2 classes). Em cada unidade amostral (talhões ou zonas) foram coletadas três amostras, tanto para determinação da produtividade quanto da qualidade.

4.2.4 Determinação da produtividade

As amostras destinadas aos cálculos de produtividade foram apenas pesadas e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de 40°C ($\pm 1^\circ C$) até atingirem $\pm 12\%$ de umidade (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013). O café beneficiado foi determinado retirando-se a casca dos grãos secos,

sendo esses submetidos à pesagem, obtendo-se a massa de café beneficiado. De posse da área correspondente a cada ponto determinado na malha amostral, os valores de café úmido e os valores de café beneficiados foram convertidos em kg ha⁻¹ (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013)

4.2.5 Determinação da qualidade da bebida

Para as amostras destinadas à qualidade da bebida, foram selecionados apenas os frutos no estágio de maturação completa, também formadas por amostras simples, neste caso de plantas de toda a lavoura de forma representativa, não apenas das plantas marcadas. Após a colheita, os frutos selecionados foram lavados para a retirada dos frutos boia, colocados em sacolas teladas de malha fina e encaminhados para a estufa de circulação forçada de ar a 40°C (±1°C) até atingirem ±12% de umidade (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2013)

As amostras secas foram beneficiadas utilizando-se um descascador de amostra portátil modelo DRC-1 nº 830. Depois foram armazenadas em embalagens plásticas por um prazo de aproximadamente dois meses até a realização do teste de qualidade sensorial.

A qualidade foi avaliada por meio de suas características físicas e pela análise sensorial, também conhecida como teste da xícara, por meio das características de doçura, sabor, acidez, corpo, equilíbrio e qualidade global. As análises foram realizadas conforme as regras de competições nacionais e internacionais da *Specialty Coffee Association of America* (SCAA, 2008) e seguindo a chave de resultados com a descrição da qualidade do café a partir do resultado final de sua avaliação sensorial da mesma associação, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Chave da SCAA para a classificação sensorial de cafés especiais.

Pontuação total	Descrição especial	Classificação
90 – 100	Exemplar	Especial raro
85 – 89,99	Excelente	Origem especial
80 – 84,99	Muito bom	Premium
< 80	Abaixo da qualidade especial	Abaixo de Premium

Fonte: Adaptado de SCAA (2008).

O teste sensorial foi realizado por três Q-graders, efetuando-se apenas uma determinação por degustador por amostra. Cada amostra foi composta de cinco xícaras.

4.2.6 Análises estatísticas e geoestatísticas

Primeiramente foram retirados os valores discrepantes (*outliers*) da base de dados de produtividade, em seguida os dados obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva para determinar as medidas de posição (média e mediana), dispersão (valores máximos, mínimos e coeficiente de variação) e forma da dispersão (coeficientes de assimetria e curtose).

As análises geoestatísticas foram realizadas para definir e quantificar o grau de dependência espacial das variáveis estudadas. Para cada variável avaliou-se o modelo teórico de variograma que melhor se ajustou ao modelo experimental. No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, foram determinados os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), contribuição (C_1) e alcance (a). Os valores de C_0 e C_0+C_1 foram escalonados dividindo-se os valores obtidos pela variância dos dados (VIEIRA *et al.*, 1983). O melhor modelo foi escolhido tendo como critério a menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R^2), foram testados os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear.

Para a análise da dependência espacial calculou-se o índice de dependência espacial (IDE), utilizando a relação $[C_1/(C_0+C_1)*100]$ e os intervalos propostos por Cambardella *et al.* (1994), que considera a dependência espacial forte ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e fraca ($IDE \geq 75\%$). Tendo-se verificada a dependência espacial de cada variável, foram elaborados os mapas de variabilidade espacial, utilizando a krigagem ordinária como técnica de interpolação. A krigagem é usada para estimar valores para locais não amostrados, considerando os parâmetros do variograma, que resulta em valores sem tendência e com variância mínima (SILVA *et al.*, 2008).

Após a confecção dos mapas de variabilidade espacial de ambas as safras estudadas, foi calculado o CDRi (Coeficiente de Desvio Relativo Pontual) para todas as variáveis (Equação 1), pois o coeficiente permite melhor visualizar o efeito temporal sobre as variáveis estudadas nos dois períodos de avaliação:

$$CDRi = \frac{n - (n - 1)}{n - 1} \quad (1)$$

onde:

$CDRi$ = Coeficiente de Desvio Relativo Pontual;

$n - 1$ = mapa gerado na primeira safra de estudo, e;

n = mapa gerado na segunda safra de estudo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tratando-se dos valores médios das avaliações, pode-se perceber que, independentemente da safra, os valores de pH foram semelhantes (pequena variação), mantendo-se próximos à 5,5 em ambas as medições (Tabela 2). Os valores de matéria orgânica na área tiveram um leve aumento, indo de 18,88 para 21,24 g dm⁻³, Todavia, apresentaram valores médios (1,5 a 3,0 dag kg⁻¹). Os valores de P e Prem também demonstraram um leve aumento, mas continuaram com o teor médio (4,1 a 8,0 g dm⁻³) o que pode ser causado por conta da adubação realizada de uma safra para a outra. O contrário aconteceu com os valores de potássio que de 242,29 mg dm⁻³ foi para 189,82 mg dm⁻³, essa diminuição pode-se dever à extração de nutrientes da planta principalmente nos anos mais produtivos, como o que ocorreu com a primeira safra de estudo.

Tabela 2 – Estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos de solo do cafeeiro em dois momentos.

Variável	Me	Md	Mín	Máx	Cv	Cs	Ck	W
P ₀₁	5,48	5,45	2,10	11,60	44,38	0,58	-0,19	0,96
P ₀₂	7,54	5,45	2,30	19,90	69,62	1,21	0,55	0,84
K ⁺ ₀₁	242,29	246,60	158,90	375,30	22,19	0,49	-0,05	0,96
K ⁺ ₀₂	189,82	194,80	97,40	288,90	23,54	-0,12	-0,43	0,98
Ca ²⁺ ₀₁	3,40	3,50	1,90	5,60	26,42	0,25	-0,10	0,97
Ca ²⁺ ₀₂	2,88	2,65	1,10	5,10	38,62	0,21	-1,05	0,95
Mg ²⁺ ₀₁	1,07	1,10	0,50	1,60	27,76	-0,10	-0,87	0,96
Mg ²⁺ ₀₂	0,88	0,90	0,30	1,70	45,76	0,20	-1,14	0,94
Al ³⁺ ₀₁	0,06	0,00	0,00	0,20	123,33	0,81	-0,70	0,74
Al ³⁺ ₀₂	0,11	0,05	0,00	0,50	135,00	1,45	1,33	0,74

Variável	Me	Md	Mín	Máx	Cv	Cs	Ck	W
pH ₀₁	5,65	5,60	4,90	6,80	8,24	0,46	0,10	0,96
pH ₀₂	5,55	5,30	4,70	6,60	11,58	0,53	-1,17	0,88
H ⁺ +Al ³⁺ ₀₁	4,28	4,50	1,30	6,80	28,94	-0,27	-0,25	0,99
H ⁺ +Al ³⁺ ₀₂	5,03	5,10	1,60	8,80	40,02	0,00	-0,99	0,96
SB ₀₁	5,07	5,00	2,90	7,80	24,30	0,10	-0,48	0,98
SB ₀₂	4,24	4,10	1,70	7,50	36,83	0,17	-1,08	0,96
t ₀₁	5,18	5,00	3,30	7,80	21,80	0,28	-0,47	0,97
t ₀₂	4,39	4,10	2,40	7,50	32,38	0,31	-1,04	0,94
T ₀₁	9,35	8,80	7,40	12,60	14,92	0,68	-0,58	0,93
T ₀₂	9,26	9,00	7,20	12,20	13,75	0,57	-0,18	0,96
m% ₀₁	1,30	0,00	0,00	5,10	131,96	1,05	-0,27	0,76
m% ₀₂	2,32	0,00	0,00	10,10	138,05	1,16	0,08	0,75
V% ₀₁	53,56	53,85	33,10	75,60	19,40	-0,02	-0,63	0,98
V% ₀₂	46,60	41,00	17,80	81,30	39,61	0,36	-1,20	0,93
MO ₀₁	18,88	19,30	13,20	23,30	13,33	-0,23	-0,33	0,98
MO ₀₂	21,24	21,60	16,00	26,60	11,56	-0,11	0,27	0,97
Prem ₀₁	17,47	17,30	10,50	23,60	17,28	0,28	0,33	0,96
Prem ₀₂	19,71	20,10	11,70	26,70	19,78	-0,26	-0,82	0,97

Me - Média; Md - Mediana; Mín - Mínimo; Máx - Máximo; CV - coeficiente de variação; CS - coeficiente de assimetria; CK - coeficiente de curtose; w - teste de Shapiro-Wilk's a 5%; Negrito - significativo. P – mg dm⁻³; K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Al²⁺, H⁺+Al²⁺, SB, CTC efetiva (t), CTC pH 7,0 (T) – cmolc dm⁻³; V – saturação por bases (%); m – saturação por alumínio (%). Solo analisado quimicamente conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) - pH H₂O, Al (KCl 1 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹). 01 – resultado obtido na primeira avaliação; 02 – resultado obtido na segunda avaliação.

Comportamento semelhante ao do potássio, foi observado em outros nutrientes como Ca²⁺ e Mg²⁺, o que refletiu nos menores valores encontrados na SB do solo na segunda safra. Esse fato pode, também, estar relacionado à extração de nutrientes pelas plantas e adubação realizada de forma insuficiente, contando-se com a alta carga de frutos na lavoura.

Assim como houve um aumento no valor de Al³⁺, os valores de H⁺+Al³⁺ e m% também se elevaram de uma safra para a outra. O que chama atenção entre as variáveis Al³⁺ e m% é principalmente os valores muito altos de coeficiente de

variação, o que já era esperado para m%, uma vez que esse atributo está diretamente relacionado com o Al contido no solo.

Os modelos e parâmetros dos variogramas ajustados para os dados coletados nas duas safras de estudo podem ser observados na Tabela 3. O pH na segunda safra foi a variável que apresentou o menor alcance, enquanto que o maior foi para o Prem, também na segunda safra.

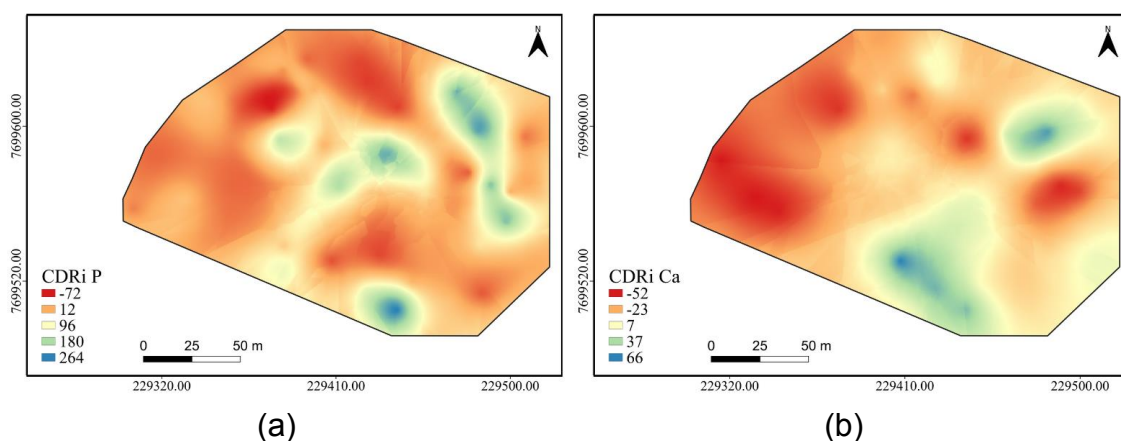
Tabela 3 – Modelos e parâmetros dos variogramas escalonados ajustados aos atributos de solo do cafeeiro em dois momentos.

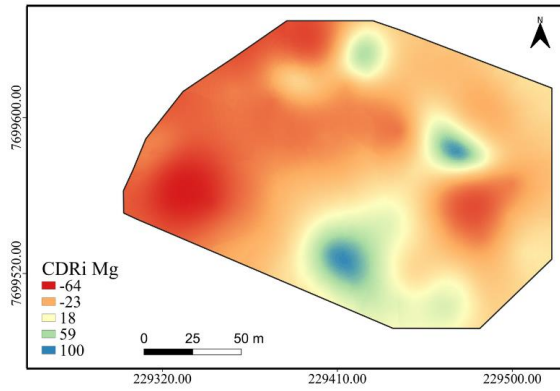
Variável	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a (m)	IDE	R ²	SE Pred
P ₀₁	Gau	0,05	1,06	41,00	5,11	86,10	2,23
P ₀₂	Esf	0,06	0,95	27,00	3,60	23,90	5,24
K ⁺ ₀₁	Esf	0,09	1,11	50,00	7,84	41,30	48,25
K ⁺ ₀₂	Esf	0,05	0,79	21,00	7,20	35,50	35,16
Ca ²⁺ ₀₁	Esf	0,18	1,05	33,00	17,21	26,20	0,73
Ca ²⁺ ₀₂	Esf	0,30	1,01	39,00	22,80	41,50	0,91
Mg ²⁺ ₀₁	Gau	0,15	1,04	33,00	14,28	85,00	0,29
Mg ²⁺ ₀₂	Exp	0,37	1,34	214,00	21,99	0,66	0,34
Al ³⁺ ₀₁	Gau	0,43	1,10	25,00	39,09	29,90	0,11
Al ³⁺ ₀₂	Epp	0,97	0,97	92,00	50,00	0,06	0,15
pH ₀₁	Gau	0,04	1,06	40,00	3,38	83,70	0,37
pH ₀₂	Gau	0,06	1,10	36,00	5,39	81,90	0,60
H ⁺ +Al ³⁺ ₀₁	Exp	0,07	0,99	263,00	6,79	76,10	0,87
H ⁺ +Al ³⁺ ₀₂	Gau	0,49	2,23	276,00	18,21	96,40	1,52
SB ₀₁	Esf	0,13	1,07	37,00	12,36	51,40	0,91
SB ₀₂	Exp	0,24	1,20	128,00	17,15	67,40	1,29
t ₀₁	Gau	0,34	1,04	37,00	32,69	75,30	0,78
t ₀₂	Exp	0,05	1,09	73,00	4,30	78,80	1,16
T ₀₁	Esf	0,17	1,44	280,00	11,57	93,70	0,99
T ₀₂	Exp	0,18	1,60	332,00	10,17	83,40	0,96
m ₀₁	Gau	0,11	1,35	64,00	8,35	63,10	1,42
m ₀₂	Gau	0,07	0,95	24,00	10,20	65,00	3,20
V ₀₁	Esf	0,21	1,06	49,00	19,86	55,70	9,19
V ₀₂	Exp	0,42	1,42	289,00	22,93	86,00	14,98
MO ₀₁	Exp	0,16	1,24	159,00	12,88	74,00	2,36

Variável	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	a (m)	IDE	R ²	SE Pred
MO ₀₂	Exp	0,07	0,92	56,00	7,20	64,10	1,88
Prem ₀₁	Esf	0,15	1,00	26,00	15,40	67,70	3,02
Prem ₀₂	Gau	0,59	2,56	323,00	18,77	80,60	3,31

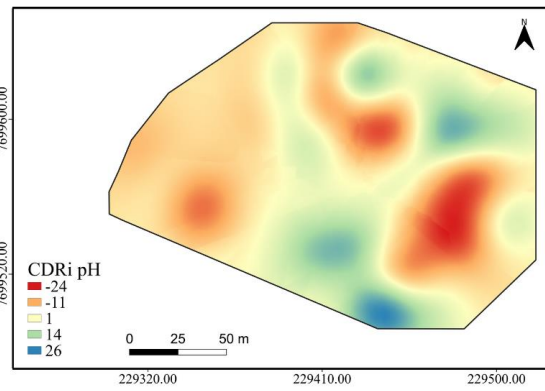
C₀ - efeito pepita escalonado; C₀+C₁- patamar escalonado; a - alcance; IDE - Índice de Dependência Espacial; SE Pred – erro padrão da estimativa; Gau – Gaussiano; Esf. – Esférico; Exp – Exponencial; Epp – Efeito pepita puro. P – mg dm⁻³; K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al²⁺, H⁺+Al²⁺, SB, CTC efetiva (t), CTC pH 7,0 (T) – cmolc dm⁻³; V – saturação por bases (%); m – saturação por alumínio (%). Solo analisado quimicamente conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) - pH H₂O, Al (KCl 1 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); Ca e Mg (KCl 1 mol L⁻¹). 01 – resultado obtido na primeira avaliação; 02 – resultado obtido na segunda avaliação.

Foi observada dependência espacial para todas as variáveis estudadas, com exceção do Al³⁺ na segunda safra, que apresentou efeito pepita puro, o que ocorre quando o espaço não representa influência nos valores para as condições amostradas. Em nenhuma das outras variáveis estudadas houve índice de dependência espacial considerado fraco, ou seja, maior do que 75%. Para a dependência espacial moderada, apenas os atributos Al³⁺ e t, avaliados na primeira safra de estudo, foram verificados. Já a dependência espacial forte, que ocorre quando o IDE apresenta valores menores do que 25% foi verificada em todos os demais atributos, conforme classificação proposta por Cambardella *et al.* (1994).

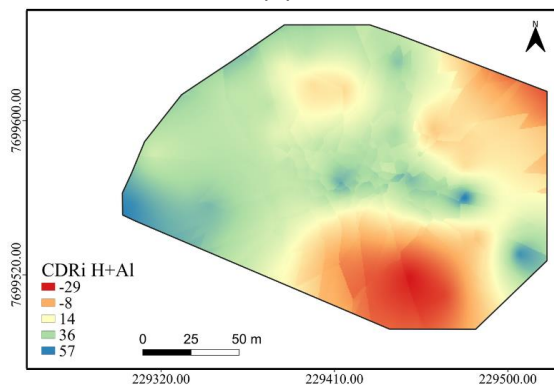




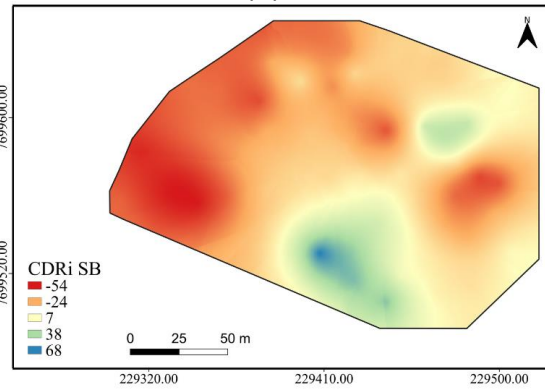
(c)



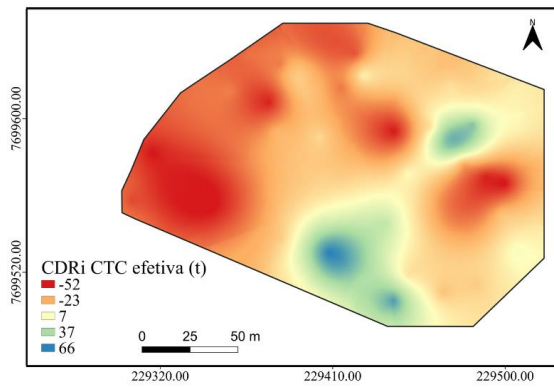
(d)



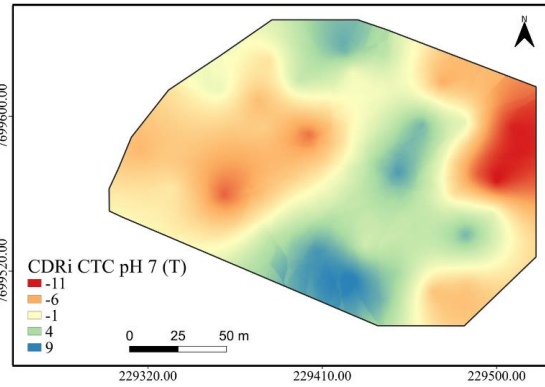
(e)



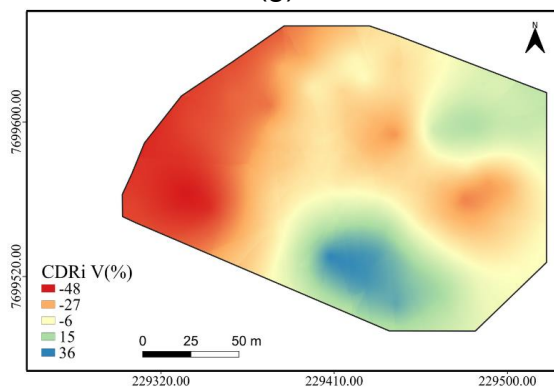
(f)



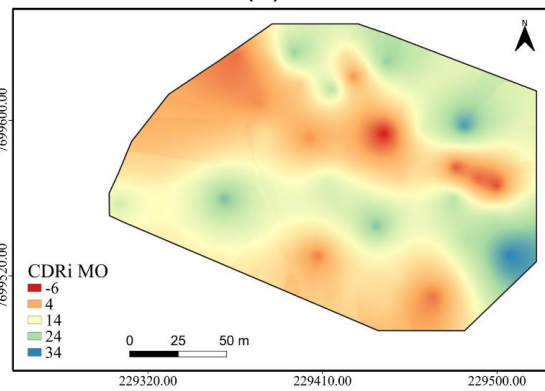
(g)



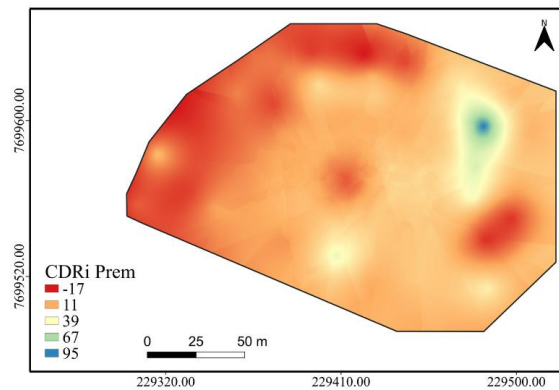
(h)



(i)



(j)



(k)

Figura 3 – Distribuição espacial do CDRi em uma lavoura cafeeira. (a) Fósforo; (b) Cálcio; (c) Magnésio; (d) pH do solo; (e) Acidez potencial; (f) Soma de Bases; (g) CTC potencial (t); (h) CTC a pH 7,0 (T); (i) Saturação por bases; (j) Matéria orgânica; (k) Fósforo Remanescente.

Analisando a Figura 3, onde são apresentados os mapas de CDRi, pode-se verificar que houve, entre as duas safras, aumento nos valores apenas de $H^+ + Al^{3+}$, tornando o solo de praticamente toda a área com elevada acidez potencial, fato esse que já tinha sido observado nas análises estatísticas discutidas anteriormente.

Por outro lado, os valores de $V\%$, Mg^{2+} , P , Ca^{2+} , t , SB e $Prem$ apresentaram diminuição em grande parte da área estudada. Assim, retoma-se mais uma vez a possibilidade de isso ter ocorrido por conta de o estudo ter sido feito em dois momentos diferentes. Ainda neste sentido, pode-se inferir que a considerável diminuição em boa parte dos atributos de solo estudados foi por conta da grande produção no segundo ano de pesquisa, tendo a planta extraído grandes proporções de nutrientes para manter a produção. Além de mapas de CDRi com aumento e diminuição dos atributos estudados, houve também mapas que demonstraram instabilidade em relação ao comportamento espacial, ou seja, locais que aumentaram e diminuíram os níveis dos atributos estudados em iguais proporções, sendo eles MO , pH , e T . Em síntese, pode-se perceber que os mapas de CDRi com diminuição dos valores dos atributos estudados dominam quando comparados àqueles com aumento e que indicam estabilidade. Ainda em relação a essa diminuição, deve-se citar o fator adubação, que foi realizado aquém das reais necessidades e da recomendação realizada no ano anterior à segunda safra. Esse fato deve-se principalmente ao aumento considerável no

preço dos fertilizantes e às incertezas diante do mercado cafeeiro, fator importante a ser citado, principalmente por conta de tratarmos de um trabalho realizado em propriedade particular.

Devido às diferenças muito grandes nos valores de m% da primeira e segunda safras, não foi possível apresentar o mapa de CDRi, uma vez que os valores muito altos prejudicaram a interpretação dos resultados. O mapa de CDRi de Al também não foi apresentado, pois o atributo apresentou efeito pepita puro na segunda safra de estudo, o que não permitiu a geração de um mapa de variabilidade espacial. O mapa de CDRi do atributo K⁺ também não foi apresentado por conta de grandes distorções na representação.

Como também não foi possível confeccionar um mapa de CDRi para ilustrar a diferença entre a produtividade entre os talhões por resultar em um mapa de amplitude muito grande e de difícil interpretação, optou-se por demonstrar a comparação entre as duas safras estudadas por meio do gráfico de barras apresentado na Figura 4.

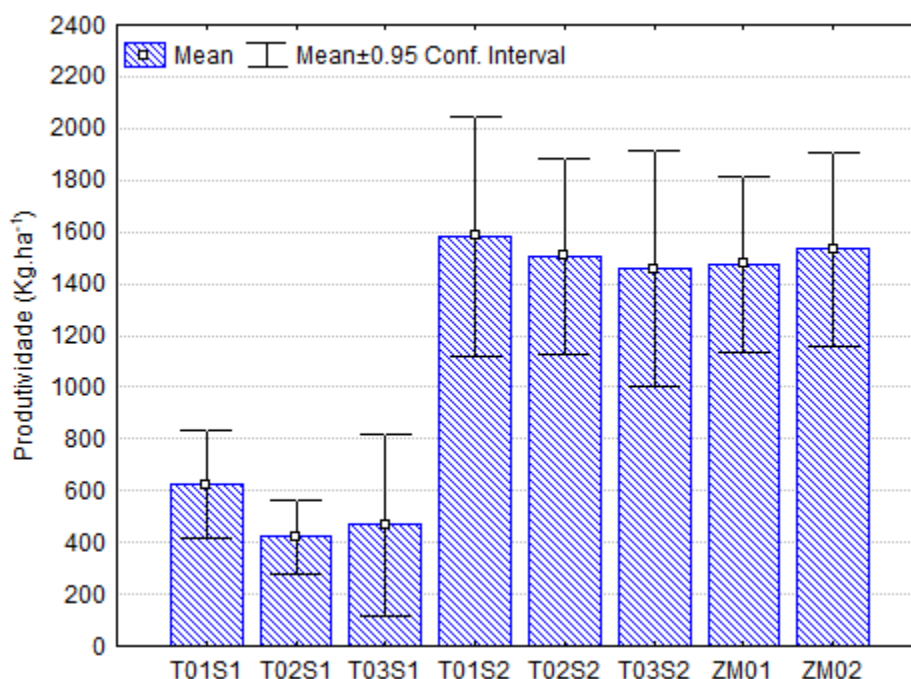


Figura 4 – Produtividade em Kg ha⁻¹ nos diferentes talhões e zonas de manejo nas duas safras de estudo. T01S1 – Talhão 01 Safra 20/21; T02S1 – Talhão 02 Safra 20/21; T03S1 – Talhão 03 Safra 20/21; T01S2 – Talhão 01 Safra 21/22; T02S2 – Talhão 02 Safra 21/22; T03S2 – Talhão 03 Safra 21/22; ZM01 – Zona de manejo 01 Safra 21/22 e ZM02 - Zona de manejo 02 Safra 21/22.

Na Figura 4 as barras representam as médias obtidas em cada talhão e cada zona de manejo estudada dentro das duas safras analisadas. Nessa figura pode-se observar que não há diferença estatística entre os talhões na primeira safra, uma vez que as barras dos intervalos de confiança se sobrepõem. O mesmo acontece quando são comparados os talhões e as zonas de manejo na segunda safra. No entanto, quando se observa o que ocorre entre uma safra e outra, é possível constatar que existe uma variação na produtividade, sendo esta, a respeito da estratificação, estatisticamente superior na segunda safra.

O café arábica é a espécie mais influenciada pela bienalidade obteve rendimento de 21,9 sc/ha na safra 2020/2021 (CONAB, 2021), comparando-se com o gráfico apresentado na Figura 4, observa-se que as médias alcançadas foram menos da metade da média nacional. Para a safra 2021/2022, a média nacional obtida foi de 22,5 sc/ha, apenas 2,7% superior à safra de 2020/2021, que foi um ano de bienalidade negativa, porém 30% inferior ao obtido na safra de 2020 que foi um ano de bienalidade positiva, alcançando a média de 32,2 sc/ha. Comparando-se as produtividades médias obtidas na segunda safra de estudo, observa-se valores próximos a 25 sc/ha, demonstrando que essa lavoura foi mais produtiva que a média das lavouras brasileiras em 2022.

É observada grande discrepância entre as produtividades médias entre as safras de 2020/2021 e 2021/2022, isso deve-se à necessidade de recomposição vegetal que as plantas apresentam após um ano de alta produção. Deste modo, considerando-se as zonas de manejo determinadas na área de estudo, é necessário que a adubação seja feita de acordo com as quantidades recomendadas, a fim de diminuir os efeitos da bienalidade, favorecendo o produtor nos anos de expectativa de safras menos produtivas.

O mesmo método de análise foi empregado para o estudo de qualidade da bebida, com os resultados apresentados na Figura 5. Analisando essa figura, percebe-se que todas as estratificações apresentaram cafés classificados como bebida premium e com descrição especial “muito bom”, sendo os cafés especiais, com médias acima de 80 pontos, os encontrados nas extratificações T02S1, T03S1, T02S2, T03S2 e ZM01 (SCAA, 2008). O uso de estratificações utilizando-se com base a altitude é interessante, uma vez que a altitude afeta na alocação de fotoassimilados (LAVIOLA *et al.*, 2007), esse fato foi observado

quando avaliou-se a qualidade da bebida da área dividida em zonas de manejo, resultando em maior qualidade a ZM01, que possui maior altitude.

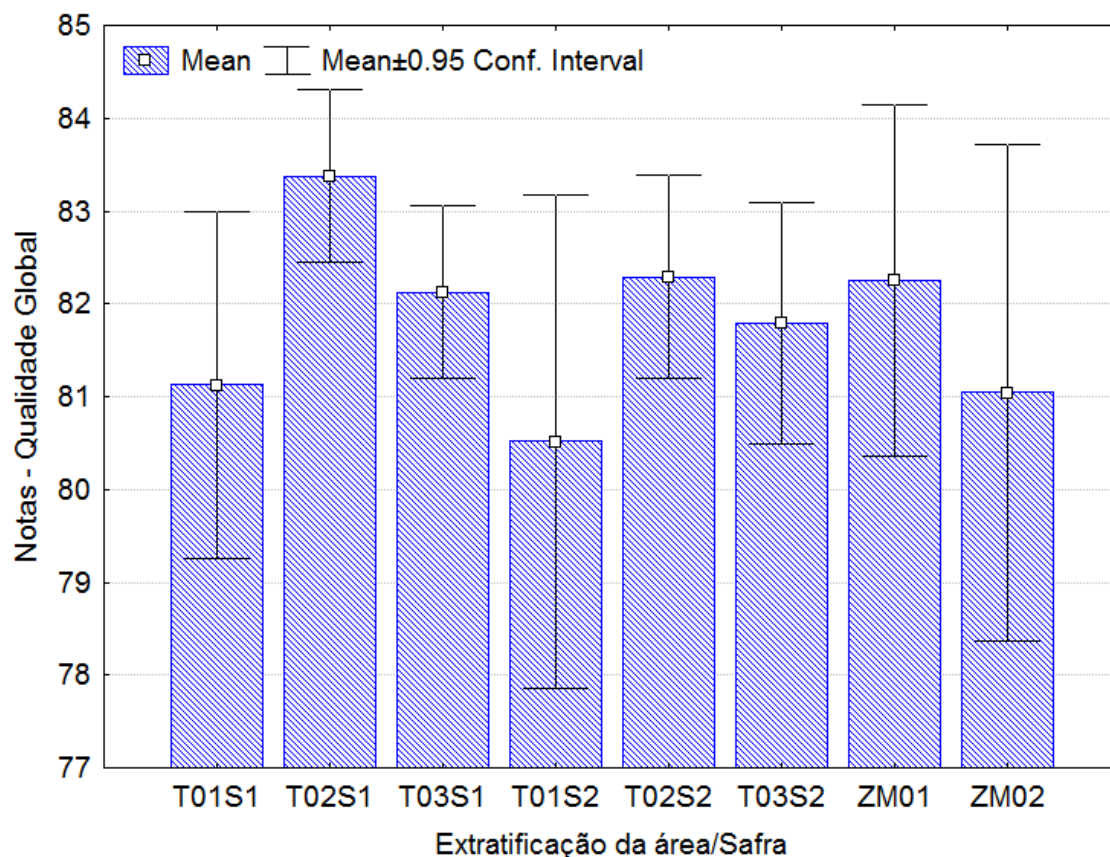


Figura 5 – Qualidade global da bebida nas diferentes estratificações nas duas safras de estudo. T01S1 – Talhão 01 Safra 20/21; T02S1 – Talhão 02 Safra 20/21; T03S1 – Talhão 03 Safra 20/21; T01S2 – Talhão 01 Safra 21/22; T02S2 – Talhão 02 Safra 21/22; T03S2 – Talhão 03 Safra 21/22; ZM01 – Zona de manejo 01 Safra 21/22 e ZM02 - Zona de manejo 02 Safra 21/22.

Em estudo semelhante, avaliando o potencial de bebida produzido na Zona da Mata de Minas Gerais, Silva *et al.* (2016) verificaram que a posição e a altitude do local de produção são as principais variáveis que influenciam a qualidade do café, isso pode ser utilizado no presente estudo, uma vez que a área de produção é declivosa e possui diversos estratos de altitude.

Houve sobreposição de todas as barras dos intervalos de confiança, o que infere na ausência de diferença estatística da qualidade da bebida entre as estratificações delineadas, seja por meio de talhões pré-definidos na área pelo próprio produtor, seja pelas zonas de manejo geradas a partir de dados de

altitude, condutividade elétrica aparente do solo e teor de argila. Porém, mesmo com a ausência de diferença estatística, a mudança positiva nas médias das notas pode significar maiores valores de vendas para cafés.

Um fato interessante a ser abordado é que, embora haja ausência de diferença estatística, as amplitudes entre os locais avaliados são distintas, sendo maiores para T01 para ambas as safras e ZM02. Justamente nesses locais de maiores amplitudes é onde alguma amostra foi classificada como café não especial, atingindo pontuação inferior a 80 na avaliação conforme metodologia proposta pela SCAA. O que pode ser entendido é que em nenhuma das outras situações há possibilidade de cafés com classificação não especial, assim recomenda-se que o produtor aposte em lotes para mercados de cafés especiais dentro dessas estratificações onde não houve resultados abaixo de 80 pontos.

4.4 CONCLUSÕES

Para todas as variáveis analisadas houve dependência espacial, exceto para o Al na segunda safra de estudo.

Comparando-se as duas safras, percebeu diminuição de grande parte dos teores de nutrientes do solo o que pode ocorrer devido à extração pelas plantas em um ano de alta produção.

Dos fatores que influenciaram na diminuição dos nutrientes do solo um foi a adubação realizada em quantidades inferiores às recomendadas, isso pode favorecer efeitos da bienalidade, já observados na cultura do café.

Todos os lotes avaliados nas estratificações apresentaram cafés com potencial para produzir uma bebida de qualidade.

Houve manutenção do padrão de qualidade nas duas safras de estudo, o que permite ao produtor apostar no mercado de cafés especiais.

4.5 REFERÊNCIAS

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 359–387, 2004.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 1501–1511,

1994.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento de safra brasileira – Safra Brasileira de Café: Quarto levantamento, dezembro 2021 – safra 2020/2021. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento de safra brasileira – Safra Brasileira de Café: Quarto levantamento, dezembro 2022 – safra 2021/2022. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>>.

CROOKSTON, R. K. A top 10 list of developments and issue impacting crop management and ecology during the past 50 years. **Crop Science**, v. 46, p. 2253–2262, 2006.

FLEMING, K. L.; HEERMANN, D. F.; WESTFALL, D. G. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 6, p. 1581–1587, 2004.

KHOSLA, R. *et al.* A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: Site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. **Precision Agriculture**, v. 9, p. 85–100, 2008.

LAVIOLA, B. G. *et al.* Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em duas altitudes de cultivo: Micronutrientes. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1439–1449, 2007.

MCBRATNEY, A.; BRETT, W.; ANCEV, T. Future Directions. **Green Energy and Technology**, v. 6, p. 7–23, 2005.

MILNE, A. E. *et al.* Spatial multivariate classification of an arable field into compact management zones based on past crop yields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 80, p. 17–30, 2012.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n.

4, p. 358–371, 2013.

SCAA – Specialty Coffee Association of America. Protocolo para análise sensorial de café – Metodologia SCAA. **SCAA Cupping Protocols**. Doc. 5. December, 2008. 13 p.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; BOTTEGA, E. L. Yield mapping of arabic coffee and their relationship with plant nutritional status. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 13, n. 3, p. 556–564, 2013.

SILVA, S. DE A. *et al.* Mapping the potential beverage quality of coffee produced in the Zona da Mata, Minas Gerais, Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 9, p. 3098–3108, 2016.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

VALENTE, D. S. M. *et al.* Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173–179, 2012.

VIEIRA, S. R. *et al.* Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1–75, 1983.

CAPÍTULO V

Conclusão geral

De modo geral, pelos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

As variáveis que determinam a produtividade do café seguem um padrão de regionalização e esse padrão deve ser considerado para a adoção do manejo a ser aplicado na lavoura. Para que a CEa seja capaz de descrever a variação de determinado atributo, é importante que as avaliações de ambos sejam realizadas no mesmo período. É no período de granação dos frutos quando os índices de vegetação se relacionam com a produtividade do cafeeiro.

Em relação ao delineamento das zonas de manejo, verificou-se que não se justifica a utilização de índices de vegetação pois isso torna o processo mais trabalhoso. Para a condução da área estudada em zonas de manejo, recomenda-se dividir a área em duas classes e utilizar a combinação das variáveis altitude, argila e CEa.

Quanto às mudanças observadas nas duas safras de estudo, percebeu-se diminuição de grande parte dos teores de nutrientes do solo, isso pode ter ocorrido devido à extração pelas plantas em um ano de alta produção. Como a adubação foi realizada em quantidade aquém da recomendada o efeito da bienalidade pode ter sido favorecido. A respeito da qualidade da bebida, verificou-se que todos os lotes avaliados apresentaram cafés com potencial para qualidade, padrão esse que manteve-se nas duas safras de estudo, o que é interessante para o produtor, permitindo-o apostar no mercado de cafés especiais mais valorizados.

