



AMARA LANA VALIM DE ABREU

**USO DE SENSORES LIDAR EM RPA NO
MONITORAMENTO DE CAFEEIROS ATINGIDOS POR
GEADA**

**LAVRAS-MG
2025**

AMARA LANA VALIM DE ABREU

**USO DE SENSORES LIDAR EM RPA NO MONITORAMENTO DE CAFEEIROS
ATINGIDOS POR GEADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em sensoriamento e geoprocessamento, para a obtenção do título de Mestre.

**Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva
Ferraz Orientador**

**LAVRAS-MG
2025**

Abreu, Valim Lana Amara de.

Uso do sensor lidar em rpa no monitoramento de cafeeiros atingidos por geada / Amara Lana de Abreu. - 2025.

70 p. : il.

Orientador(a): Gabriel Araújo e Silva Ferraz.

Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Manejo otimizado. 2. Análise espacial. 3. Aeronaves automatizadas. 4. Cultivo de café I. Ferraz, Gabriel Araújo e Silva. II. Título.

AMARA LANA VALIM DE ABREU

**USO DE SENSORES LIDAR EM RPA NO MONITORAMENTO DE CAFEEIROS
ATINGIDOS POR GEADA
USE OF LIDAR SENSORS IN RPA FOR MONITORING COFFEE TREES
AFFECTED BY FROST**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento e geoprocessamento, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 12 de maio de 2025

Dr. Lucas Santos Santana

Dr. Mirian de Lourdes Oliveira

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Orientador

LAVRAS-MG
2025

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – código 001) pelo apoio financeiro concedido ao longo do período da minha pós-graduação.

Ao Programa de Pós Graduação e ao Núcleo de Estudos (NESA) e à EMBRAPA Café-Consórcio Pesquisa Café pelo financiamento do projeto nº 10.18.20.041.00.00.

Agradecer ao CNPq pelo concedimento de recursos para o Projeto nº 310186/2023-4, que foram indispensáveis para a execução do presente projeto.

RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) baseia-se na coleta e análise de dados para compreender a variabilidade espacial dentro da lavoura, permitindo ao produtor agrícola otimizar o uso de insumos como fertilizantes, defensivos e água. Por meio de tecnologias como sensores, GNSS, aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) e softwares de gestão, a AP auxilia nas intervenções necessárias, aumentando a eficiência produtiva, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais. O presente estudo procura avaliar o potencial de um sensor LiDAR embarcado em uma RPA, para mapear danos em cafeeiros após ocorrência de geada. Para tal, o experimento foi conduzido em Santo Antonio do Amparo, em 3 lavouras cafeeiras, com idades de 3, 4 e 10 anos de plantio. As lavouras cafeeiras foram afetadas em anos distintos pela geada (2019 e 2021) e o experimento para obtenção das informações foi conduzido em maio de 2023. Após a obtenção dos dados da população de plantas (altura da planta e diâmetro da copa), foram realizadas análises utilizando ferramentas estatísticas multivariadas de agrupamento não hierárquico para classificação dos cafeeiros em 2 grupos, de acordo com a incidência de geada, sendo eles: 1 plantas com maior incidência de geada e 2 menor incidência de geada. Com o intuito de comparar as médias das variáveis entre os grupos 1 e 2, realizou-se a análise de variância. Foram propostas também duas novas classificações para os grupos 1 e 2, baseadas na análise de agrupamentos não hierárquica *k-means*. Para tal, foram utilizadas em um agrupamento as variáveis altura e diâmetro de copa, e em outro, as variáveis consideradas foram altura, diâmetro de copa e altimetria, para as 3 áreas em estudo. Assim, o presente estudo possibilitou desenvolver e testar uma metodologia de mapeamento de zonas de ocorrência de geadas por meio de agrupamentos baseadas em dados obtidos por LiDAR, analisar se os grupos afetados após a ocorrência de geada apresentaram diferenças das variáveis analisadas altura de planta, diâmetro de copa, volume de planta e IAF, assim obteve-se resultados satisfatórios no estudo.

Palavras-chave: agricultura de precisão; geada; aeronaves automatizadas; cafeicultura.

ABSTRACT

Precision Agriculture (PA) is based on data collection and analysis to understand spatial variability within the workforce, allowing agricultural production to optimize the use of inputs such as fertilizers, pesticides and water. Through technologies such as sensors, GNSS, remotely piloted aircraft (RPAs) and management software, PA assists in controlled interventions, increasing production efficiency, reducing costs and minimizing environmental impacts. This study aims to evaluate the potential of a LiDAR sensor embedded in an RPA to map damage to coffee plants after incidents. To this end, the experiment was conducted in Santo Antonio do Amparo, in 3 coffee activities, with planting ages of 3, 4 and 10 years. Coffee crops were affected in different years by the Pacific (2019 and 2021) and the experiment to obtain the information was completed in May 2023. After obtaining the data on the plant population (plant height and canopy diameter), analyses were performed with tools using multivariate hierarchical clustering statistics to classify the coffee plants into 2 groups, according to the incidence of incidence, being: 1 plants with the highest incidence and 2 with the lowest incidence. In order to compare the means of the variables between groups 1 and 2, an analysis of variance was performed. Two new classifications were also proposed for groups 1 and 2, based on the analysis of non-hierarchical k-means clustering. For this, the variables of height and canopy diameter were used in one grouping, and in another, the variables of height, canopy diameter and altimetry were considered, for the 3 areas under study. Thus, the present study made it possible to develop and test a methodology for mapping occurrence zones through groupings based on data obtained by LiDAR, analyzing whether the groups affected after the occurrence of occurrences found differences in the variations demonstrated in plant height, canopy diameter, plant volume and IAF, thus obtaining impressive results in the study.

Key words: precision agriculture; frost; automated aircraft; coffee growing.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo objetivou avaliar o potencial de um sensor LiDAR embarcado em RPA para mapear danos por geada em cafeeiros, contribuindo para a Agricultura de Precisão (AP). A pesquisa, realizada em maio de 2023 em Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, abrangeu três lavouras de café com idades de 3, 4 e 10 anos, afetadas por geadas em 2019 e 2021. Observou-se que a tecnologia LiDAR, ao coletar dados de altura e diâmetro da copa das plantas, permitiu a classificação dos cafeeiros em grupos de maior e menor incidência de geada por meio de análises estatísticas multivariadas de agrupamento não hierárquico (k-means), com resultados satisfatórios. Os impactos tecnológicos deste trabalho são significativos, visto que se desenvolveu e testou uma metodologia inovadora para o mapeamento de zonas de ocorrência de geadas, aprimorando a capacidade de monitoramento e gestão de lavouras. Socialmente e economicamente, a aplicação dessa metodologia pode gerar benefícios substanciais para os produtores de café nas regiões afetadas por geadas, como o sul de Minas Gerais. A identificação precisa das áreas danificadas possibilita uma tomada de decisão mais assertiva quanto ao manejo pós-geada, otimizando o uso de recursos, reduzindo custos com insumos e minimizando perdas na produção. Isso, por sua vez, contribui para a segurança alimentar e a estabilidade econômica das comunidades rurais dependentes da cafeicultura. Além disso, o uso da AP, ao otimizar o uso de insumos, tem um impacto ambiental positivo, contribuindo para uma agricultura mais sustentável.

IMPACT INDICATORS

The study aimed to evaluate the potential of a LiDAR sensor embedded in an RPA for mapping frost damage in coffee plants, contributing to Precision Agriculture (PA). The research, conducted in May 2023 in Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, covered three coffee plantations aged 3, 4, and 10 years, affected by frosts in 2019 and 2021. It was observed that LiDAR technology, by collecting data on plant height and canopy diameter, allowed the classification of coffee plants into groups of higher and lower frost incidence through multivariate non-hierarchical clustering statistical analyses (k-means), with satisfactory results. The technological impacts of this work are significant, as an innovative methodology for mapping frost occurrence zones was developed and tested, improving the capacity for monitoring and managing crops. Socially and economically, the application of this methodology can generate substantial benefits for coffee producers in regions affected by frosts, such as southern Minas Gerais. The precise identification of damaged areas enables more assertive decision-making regarding post-frost management, optimizing resource use, reducing input costs, and minimizing production losses. This, in turn, contributes to food security and the economic stability of rural communities dependent on coffee cultivation. Furthermore, the use of PA, by optimizing input usage, has a positive environmental impact, contributing to more sustainable agriculture.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1 Cafeicultura brasileira.....	11
2.1.1 Altura de planta e diâmetro de copa de culturas de campo	11
2.1.2 Geadas	14
2.1.2.1 Avaliação de geada	17
2.2 Agricultura de precisão e cafeicultura de precisão	19
2.2.1 Sensor LiDAR	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Processamento de dados obtidos pelo sensor LiDAR	27
3.2 Análises Estatísticas	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 . Área 1	30
4.1.1. Análise de variância para os agrupamentos 1 e 2	33
4.2 Área 2	42
4.2.1. Análise de variância para agrupamento 1 e 2	43
4.3. Área 3	50
4.3.1. Análise de variância para o agrupamento 1	52
4.3.2. Análise de Variância para agrupamento 2	56
5. CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira se encontra em expansão, apesar das condições que desfavorecem a cultura devido a fatores climáticos, nas mais diversas regiões produtoras do território brasileiro (Conab, 2023). A cafeicultura de precisão (CP) consiste em um conjunto de técnicas e tecnologias que aperfeiçoam os recursos utilizados pelo cafeicultor, identificando a variabilidade espacial na lavoura (Ferraz et al. 2012, p.81).

Santana et al. (2022, p.3) descrevem a CP como práticas que maximizam a busca incessante pelo rendimento e pela melhoria da qualidade final do produto.

A geada é um fenômeno natural que ocorre quando a temperatura do ar cai abaixo do ponto de congelamento da água, afetando diretamente o ambiente e plantas ao redor. A topografia do terreno influencia os padrões de geada, resultando em diferentes níveis de acúmulo de ar frio em um mesmo plantio. Em plantas cafeeiras, a geada causa a redução da área foliar, logo redução da capacidade da planta em se desenvolver pela fotossíntese. Essa ocorrência gera necrose na planta cafeeira e a senescência das folhas, o que diminui a absorção da radiação solar e conseqüentemente a fotossíntese. Em alguns casos, a planta pode sofrer perda da área foliar e assim ter suas funções fisiológicas e ciclo produtivo alterados, aumentando a probabilidade de morte. A geada também dificulta a renovação dos plantios e a produção nos anos seguintes, impactando negativamente a economia dos produtores. Assim, a geada é um fenômeno climático que afeta diretamente a produção de café, causando diversos danos aos cafeeiros e impactando a produtividade e a economia dos produtores.

O uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), aliada a telemetria e uso de tecnologias não invasivas, como câmeras e sensores, podem auxiliar na obtenção remota de dados de plantas cafeeiras, a partir de análises espaciais, geoprocessamento e coleta de informações da área e das plantas de uma forma não invasiva, auxiliando direta ou indiretamente a agricultura. Os sensores e câmeras de alta resolução espacial, oferecem alta aplicabilidade para coletas remotas e, também, para a cafeicultura de precisão, devido características autônomas, a facilidade de acesso em áreas de alta complexibilidade ao homem, a obtenção de informações de áreas e de plantas, e a possibilidade de serem utilizados diversas vezes ao longo do ciclo produtivo e em diferentes processos.

Atualmente a utilização de equipamentos do tipo radar, como exemplo LiDAR (*Light Detection and Ranging*) são incipientes na cafeicultura. É possível encontrar alguns exemplos de utilização deste equipamento em culturas anuais, na construção civil e em ambientes florestais. Este equipamento possibilita a obtenção de informações de dimensões de estruturas

mais precisas, possibilitando identificar e aprimorar as tomadas de decisões, ao contrário das imagens de satélite e de fotografias aéreas, assim mapear o terreno das estruturas trazendo maiores exatidões.

A aplicação dessas técnicas, alguns anos atrás, era extremamente desafiadora, principalmente devido à dificuldade de obtenção de equipamentos e à complexidade do processamento das informações. A coleta in loco sem essas ferramentas, obtidas visualmente ou manualmente, tornam-se uma atividade laboriosa, que pode implicar em longos períodos para a aquisição de dados. Diante do exposto, a proposta do presente trabalho foi avaliar, por meio da utilização de LiDAR associado a RPA, utilizando técnicas de geoprocessamento com tratamento estatístico dos dados, a definição de locais com diferentes incidências de danos por geada. Para avaliar a proposição citada, o presente trabalho teve por objetivos:

- a) Desenvolver e testar uma metodologia de mapeamento de zonas de ocorrência de geadas, por meio de agrupamentos, baseadas em dados obtidos com LiDAR embarcado em uma RPA;
- b) Avaliar se os grupos de plantas afetadas pela geada apresentam diferenças significativas nas variáveis analisadas: alturas de plantas, diâmetros de copas, volume da planta e Índice de Área Foliar (IAF);
- c) Usar dados obtidos com LiDAR embarcados em RPA, para o agrupamento de plantas cafeeiras atingidas após geada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cafeicultura brasileira

A cafeicultura é responsável por um valor significativo da produção brasileira e mundial. O Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo destaque com um dos maiores geradores de riquezas e um dos produtos mais importante da história nacional (MATARAZZO, 2013; BRAINER, 2021). Hoje, o café continua sendo um importante gerador de divisas e uma das commodities representantes das regiões brasileiras, juntamente com as culturas soja e milho (EMBRAPA, 2024).

Segundo dados obtidos pelo boletim nacional da EMBRAPA (EMBRAPA, 2024) a cafeicultura brasileira é responsável por uma receita anual de 2 bilhões de dólares, ou 1560 s de kg de grãos de café, contribuindo com mais de 2% do valor total das exportações brasileiras e respondendo por mais de um terço da produção mundial. De acordo com o levantamento da Companhia nacional de abastecimento (Conab, 2023), foram destinadas à cafeicultura nacional em 2024 uma área plantada de 2,24 milhões hectares, sendo 1,84 milhão de hectares para lavouras em produção e 402 mil hectares de área em formação, o que representa um aumento de área total cultivada em regiões brasileiras. Ainda como lembra a Conab (2023), a produção cafeeira brasileira estimada para a safra de 2024 é de 54,94 milhões de sacas de 60 kg, sendo composta por diferentes espécies cafeeiras. Frente ao exposto a cafeicultura se mostra promissora, beneficiando e alavancando diferentes setores econômicos nas regiões brasileiras. Contudo a cafeicultura ainda necessita de alternativas e novas pesquisas para enfrentar os desafios e contornar os problemas de campo na busca de altas produtividades e redução de custos operacionais.

2.1.1 Altura de planta e diâmetro de copa de culturas de campo

O café é uma cultura ainda em crescimento e dada a sua importância na estrutura econômica do país (CHIES et al., 2012, p.27), o cultivo de cafeeiros requer técnicas de monitoramento e estratégias para melhorar suas condições de produção (LOPES, 2014). Nos dias atuais um dos desafios enfrentados pelos cafeicultores está na mão de obra no campo, que a cada dia vem diminuindo a sua disponibilidade (FARIAS et al., 2014, p.118). Assim sendo, torna-se necessário a aplicação e desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias que possibilitem a obtenção de informações das plantas cafeeiras, ocasionando a redução de visitas a campo e redução de custos envolvidos no processo.

Segundo Ferraz et al. (2017, p.81) a altura de planta e o diâmetro de copa de cafeeiros são importantes características de crescimento da planta, estes indicam seu desenvolvimento. Estão intimamente relacionadas ao manejo imposto à lavoura. As informações de altura de planta e diâmetro de copa de plantas podem ser de grande eficácia para auxiliar diferentes tomadas de decisões. Carvalho et al. (2006, p.243) descreve que a mensuração da altura das plantas cafeeiras é um grande indicador para planejamento de irrigação de cafeeiros. Estes autores afirmam ainda que as relações entre altura das plantas e o diâmetro de copa, apresentaram comportamento assintótico, mostrando que para a irrigação estas informações influenciam nos resultados obtidos. De acordo com estes autores, as plantas irrigadas apresentaram alturas mais elevadas, maior diâmetro de copa e maior número de ramos plagiotrópicos por planta do que aquelas não irrigadas.

Carvalho et al. (200, p.187), afirma que a altura das plantas tem correlação e importância com produtividade e ciclo reprodutivo na cultura. Assim a tal pesquisa foi baseada em dados obtidos da produtividade e da altura das plantas independentemente da distribuição adotada; estes obtiveram informações satisfatórias para determinar a precisão experimental, onde o limite máximo de coeficiente de variação aceitável para a produtividade é de 16% e para altura da planta é de 12%.

Favarin et. al (2002, p.769), discutiram a variável altura, diâmetro de copa e volume de copa em estudos de estimativas do índice de área foliar de cafeeiros, A obtenção dos dados foi realizada manualmente. Estes avaliaram a variação temporal, do cafeeiro (*Coffea Arabica* L.), e afirmam que os dados para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro estão correlacionados com a realização de fotossíntese e produtividade das plantas cafeeiras.

Atualmente a obtenção de informações das plantas cafeeiras tais como altura de planta e diâmetro de copa consiste em visitas às áreas de interesse realizando medições com equipamentos graduados, onde as plantas serão mensuradas uma a uma, sendo necessária a presença de mão de obra a campo e o deslocamento a área desejada (BENTO et al., 2022; FERRAZ et al., 2017; GONÇALVES et al., 2018). Existem diferentes métodos de obtenção de altura de plantas baseadas em períodos e idades distintos da cultura do café, para uma obtenção mais assertiva.

Em seus estudos, Almeida et al. (2018, p.515) propôs a obtenção das informações das plantas, em plantas cafeeiras com 21 dias de plantio as coletas foram realizadas por meio de uma régua graduada e as informações foram obtidas coletando-se as dimensões da plântula. Estes autores apresentaram as informações sendo a altura de planta coletada na dimensão da

parte do caule ao dossel da plântula, e o diâmetro de copa, sendo aferido pelo diâmetro do caule.

Conforme Costa (2019) e Favarani (2002), a obtenção das informações diâmetro de copa e altura da planta cafeeira, assemelhadas a uma estrutura cônica. Assim as informações de altura da planta na dimensão da estrutura da parte aérea e os diâmetros de copas baseiam-se na subdivisão dos diâmetros de copa inferiores, médios e superiores dos dossel da planta.

Trabalhos de Panagiotidis et al. (2016, p.2392) utilizaram medidas disponíveis em softwares de geoprocessamento, e com isso correlacionaram estes dados com informações de campo e obtiveram precisão aceitável concluindo que o método é viável para extração de tais parâmetros, estes estimaram altura da planta e diâmetro de copa de uma área florestal por meio de imagens obtidas por RPA, para as alturas utilizaram modelos de altura de dossel (*Canopyheight models- CHM*) e para diâmetro de copa, as imagens foram segmentadas e utilizaram ferramentas de rasters. Em estudos de Gonçalves et al.(2022, p.1320), utilizando estas mesmas técnicas, a autora analisou plantas cafeeiras durante 10 meses, observou para o cafeeiro, as medidas da RPA. No entanto, os dados de altura dos cafeeiros, medidos em campo e estimados pela RPA, para cada mês apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,78 nos 10 meses analisados por estes autores.

Conforme Barata et al. (2024, p.20) as variáveis altura de planta, diâmetro de copa, área do dossel e IAF de mudas cafeeiras obtidos por aeronaves (RPAs). Os autores observam que as variáveis de crescimento do cafeeiro durante o ciclo de produção apresentaram um padrão linear de aumento, principalmente na altura de planta, área do dossel e IAF. Estes afirmam que o aumento da área foliar é crucial para a fotossíntese e produção de assimilados pela planta, garantindo um bom estabelecimento inicial da cultura no campo e, assim, reduzindo a necessidade de replantio de mudas às condições de campo

Bento et al (2023, p.3) analisaram altura do dossel e índices de vegetação (IVs), juntamente com compactação do solo em uma área cafeeira. Estes autores amostraram altura da planta, resistência do solo e produtividade e observaram a existência de diferenças estatísticas significativas entre as zonas de altura das plantas para a resistência à penetração, que se correlaciona com os dados de produtividade dos cafeeiros.

Bento et al (2022, p.207) aplicaram técnicas de agricultura digital consorciada com RPAs para obtenção da altura e diâmetro de copa de plantas de cafeeiros, e calcularam a altura da planta e o diâmetro da copa das plantas por meio de imagens aéreas obtidas por RPAS. A equação de estimativa linear para altura da planta e diâmetro da copa foi

determinada com resultados satisfatórios pelos coeficientes R e R² e métricas de desempenho MAE, RMSE e resíduos de regressão, sendo possível monitorar o perfil temporal da altura de planta da cultivar de café no campo com base em imagens aéreas de RPAs.

Barbosa et al (2021, p.5), observou alturas de plantas e diâmetro de copas das plantas, através de imageamento com RPA e câmera RGB e apresentaram o potencial de aplicação de índices de vegetação, juntamente com o índice de área foliar, obtido pela coleta. Os resultados obtidos pelos autores apresentaram índices MPRI (0,31) e GLI (0,41) e uma maior correlação com o IAF; entretanto, ainda assim a correlação foi fraca. Mapas temáticos de índices de vegetação (IV) no período avaliado mostraram variabilidade presente na lavoura.

De acordo com Holman et al.(2016, p.1031),um método para derivar a altura de planta em culturas de grãos e a taxa de crescimento das colheitas a partir de modelos de superfície digital 3D. Em seus estudos o modelo de superfície mais preciso derivado de RPA alcançam um erro quadrático médio (RMSE) de 0,03 m em comparação com o método de regra manual de 2m existente. Estes autores afirmam que os modelos de superfície digitais produzidos fornecem um novo mapeamento espacial da variação da altura de planta de culturas anuais tanto na escala de campo quanto dentro de parcelas individuais, para cultura anual.

Em seus estudos, Geilpel et al. (2014) estudaram um método para determinação da altura de planta da cultura do milho com a utilização de imagens obtidas por RPA com diferentes resoluções espaciais.Estes utilizam uma RPA para capturar um conjuntos de dados de imagens RGB padrão para previsão de rendimento de grãos de milho em estágios de crescimento do início ao meio da estação. As imagens foram processadas em ortoimagens e três modelos de regressão linear foram testados em sua capacidade de previsão. Os modelos mostram coeficientes de determinação (R²) de até 0,74.

Portanto, informação de altura de planta e diâmetro de copa obtido das culturas se torna uma importante ferramenta para a produção cafeeira. Entretanto nenhuma das pesquisas realizadas estudou de áreas atingidas por geada com a aplicação do sensor LiDAR embarcado em RPA, o que se torna promissor a realização de estudos como este.

2.1.2 Geada

A geada é um fenômeno natural que se manifesta próximo ao chão com a queda das temperaturas durante a noite, levando ao forte resfriamento do ar (SOFFIATI, 2022; CUNHA, 1997; PERISSATO, 2013). Para o cafeeiro, a temperatura letal é menor que -2°C e nessas condições a cultura costuma ser afetada por geadas denominadas popularmente como de

“canela” ou de “capote”, dependendo da parte da planta afetada (PARTELLI,2009; ROSISCA, 2021, EMBRAPA, 2021). Em condições de alta umidade na atmosfera, ela também provoca a formação de gelo na superfície das plantas, característica da geada branca, mas ela pode vir sem a presença do gelo, geada negra (MELO et. al., 2010, p.141). As geadas ocorrem em função do deslocamento de massas de ar polar, propiciando condições para a queda da temperatura até o ponto de congelamento interno das plantas, abaixo de 0°C medido próximo ao solo (CUNHA et al., 2021).

Como lembra Taiz et al. (2017) e Cezar et al. (2015) os efeitos da geada são visíveis nas plantas, pois a massa de ar gelada que sobrepõe as lavouras, ocasiona a queima das estruturas celulares das folhas, pois a massa de ar gelada que passa pelo ápice dos ramos da planta normalmente permanece por algum tempo, desidratando, queimando e ocasionando a morte ou a quebra da dominância apical. Esse mecanismo de dominância apical é uma ação inibitória da gema apical sobre as gemas axilares presentes nos nós da planta, induzindo as gemas vegetativas, presentes na porção do ramo, referente aos que cresceu na estação passada, a saírem da dormência e a emitirem várias brotações naquele nó, gerando competição com as gemas reprodutivas.

Este fenômeno citado anteriormente causa danos severos nos tecidos das plantas, podendo levá-las à morte, dependendo de sua idade, condições nutricionais e tempo de exposição a temperaturas letais (PARTELLI, 2009; RAMALHO, 2003; MORAIS, 2001). Levantamentos realizados pelo Conselho nacional de agricultura brasileira (Conab, 2022), concluíram que as geadas ocorridas nos estados brasileiros em julho de 2021 afetaram a safra, reduzindo sua expectativa de produtividade em 10%, comparada com períodos anteriores, este mesmo levantamento estimou quedas de produção de até 30% em algumas regiões brasileiras.

Atualmente, os cafeicultores e pesquisadores buscam alternativas para solucionar e reduzir os danos em áreas afetadas pelos efeitos meteorológicos, como é o caso da geada (MORAIS et al.,2007), tornando um grande desafio a obtenção de informações assertivas das plantas afetadas, visto que o deslocamento a campo pode exigir gastos e disponibilidade de profissionais habilitados. As alternativas utilizadas para reduzir e solucionar estes danos provocados na cafeicultura são limitadas e em alguns casos de alto custo ao cafeicultor, fazendo-se necessária a pesquisa e busca por novas metodologias que sejam mais acessíveis economicamente. Uma das alternativas ao agricultor é utilizar técnicas de zoneamento agroclimático (EVANGELISTA et al.,2002, p.445), para fazer essa avaliação e entender se sua região é apta ao cultivo escolhido, e se a região corresponde a baixo ou altos riscos climáticos que ele pode vir a estar exposto (MARIN et al., 2021a, 2021b).

Contudo, um dos desafios da agricultura é manejar áreas que já foram implantadas sem o devido planejamento por parte dos agricultores acerca da ocorrência de geadas, como apresentado por (MARIN et al.2021a, 2021b) ou mesmo necessidade de plantar em áreas características de vales, visto que as regiões mineiras são características de elevadas e baixas altimetrias (NUNES et al.,2019, p.3775). De forma geral, os cafeeiros são mais sensíveis às baixas temperaturas por se localizarem próximos ao solo e para mitigar isso, o agricultor pode recorrer a técnicas de monitoramento pós ocorrência de geada (VALENTE et al., 2024, p.1005). Atualmente todo o processo de identificação e acompanhamento das condições das plantas cafeeiras é realizado por meio de observações a campo, realizadas de forma manual ou visual, onde o acompanhamento das plantas atingidas pela geada são identificadas visualmente por 3 pessoas aplicando-se uma classificação ao nível de dano da planta, o que permite a entrada de novos estudos baseados nas ferramentas de agricultura de precisão (MARIN et al. 2021, p.1845).

Algumas dessas práticas de recuperação do cafeeiro exigem a poda da planta, para que assim ela se renove, segundo a Epamig (2021) a necessidade de poda deve ser avaliada de acordo com a região afetada da planta pela geada, observando-se os danos causados por este evento, quer seja ele um dano superficial nas bordas da planta ou quer seja um dano em toda a planta. Os danos podem ser classificados, conforme destacado pelos boletins técnicos da Epamig (2021), como: dano severo do terço superior do cafeeiro; dano severo em grande parte dos ramos plagiotrópicos; dano severo nos ramos ou a renovação do cafezal, entretanto um dos desafios é identificar esses danos na planta cafeeira em grandes lavouras, levando o produtor a ter a disponibilidade de mão de obra especializada, e custo na obtenção do serviço, visto que os danos às plantas reduzem características físicas do café, necessitando uma identificação das plantas afetadas.

Conforme Valente et al (2024, p.1020), a geada exerce um impacto global na produção de café, sendo a topografia um fator determinante na variação do acúmulo de ar frio na plantação, resultando em zonas mais propensas a danos causados pelo fenômeno. A sensibilidade do cafeeiro, sobretudo nos primeiros anos, torna os métodos tradicionais de avaliação suscetíveis a erros e diagnósticos tardios. A utilização de ferramentas de agricultura de precisão consorciada a sensores modernos proporciona imagens com alta resolução temporal e espacial, permite identificação detalhada de danos por geada através da resposta espectral, o que pode ser observados nos trabalhos do autor, com a aplicabilidade de RPAs e sensores para identificação de plantas afetadas por geada através de análises dos índices de vegetação.

2.1.2.1 Avaliação de geada

A avaliação de danos causados por geadas em cafezais é um tema de grande relevância para a cafeicultura, especialmente em regiões suscetíveis a este fenômeno climático. A literatura científica oferece diversas abordagens para a análise desses danos, considerando tanto os aspectos fisiológicos das plantas quanto os impactos econômicos para os produtores. A geada provoca danos diretos às plantas cafeeiras, afetando principalmente os tecidos jovens e mais sensíveis ao frio. (DAMATTA et al, 2006; CARMARGO, 2001; ROSISCA, 2015). A avaliação visual dos danos é um método simples e rápido, porém, sua precisão pode ser limitada, uma vez que os sintomas podem não ser uniformes em toda a plantação (MARIN et al., 2021, p.1845).

A utilização de sensores remotos, como imagens de satélite e drones, também tem se mostrado promissora para a avaliação de grandes áreas e a detecção precoce dos danos. A avaliação dos danos causados pela geada é fundamental para a tomada de decisão sobre as medidas de manejo a serem adotadas. A remoção das partes danificadas, a aplicação de adubos e a utilização de produtos biológicos são algumas das práticas que podem auxiliar na recuperação das plantas e para isso é necessário o planejamento e identificação das áreas afetadas. Além disso, a avaliação dessas áreas é importante para a resposta econômica dos danos é essencial para a estimativa das perdas e para a definição de políticas de seguro agrícola. A pesquisa científica continua buscando novas ferramentas e metodologias para a avaliação dos danos causados pela geada em cafezais.

Conforme Valente et al (2024, p.1025), em seus trabalhos avaliou o impacto das geadas na cultura do café, utilizando índices de vegetação, em plantações de diferentes idades e áreas de riscos climáticos, com idade de um e dois anos. Os dados e imagens aéreas foram coletados por uma RPA, três dias após a ocorrência da geada em julho de 2021. Assim os autores afirmam as diferenças estatísticas dos dados de danos por geada nas áreas estudadas, assim foram obtidas com base no teste não paramétrico de comparação. Doze índices de vegetação foram submetidos a análise. Os resultados mostram que os doze índices de vegetação têm eficiências diferentes para evidenciar a variabilidade espacial dos danos por geada.

De acordo com Alves et al (2024, p.5) danos causados pelas geadas de julho de 2021 em cafezais na região de Alfenas e Poços de Caldas, foram obtidas através de buscas em SIGs. Estes observaram a previsão das geadas através do sensoriamento remoto e inteligência artificial, que possibilitaram ver detalhes nas lavouras não visíveis a olho nu, assim a área do

Sul de Minas afetada pelas geadas em 2021 foi de aproximadamente 156,3 mil hectares, equivalente a 17,2% da área ocupada com café, verificadas através de análise espacial do Qgis 3.16 e dados de sensoriamento.

Valente et al (2024, p.1020), avaliaram na face norte e sul da linha de plantio na área cafeeira após a ocorrência de geada, foram mensurados os números de nós por ramo, número de folhas com danos), número de flores por ramos, número de frutos por ramos, produtividade e danos por geada, adicional as análises de campo, foram realizados voos sobre as três áreas com uma RPA, estes observaram que as plantas de oito anos da face norte apresentaram maior dano por geada, enquanto em plantas de um e dois anos, a exposição solar não teve impacto significativo nos danos.

Rafaelli (2004), desenvolveu uma metodologia fundamentada no uso de imagens de satélites de média e baixa resolução temporal e técnicas de geoprocessamento para avaliar em tempo hábil o impacto de geadas em regiões cafeeiras no noroeste do estado do Paraná, foram utilizadas imagens do satélite TERRA, sensor MODIS e do satélite Landsat 5 e 7, sensores TM e ETM+. Os resultados mostraram que a resolução temporal do satélite TERRA permitiu acompanhar mudanças ambientais em tempo hábil. Os índices de vegetação NDVI e HCVI, obtidos das imagens MODIS são eficientes para o monitoramento do efeito da geada em nível estadual e localizado, logo após a ocorrência da mesma.

Valente et al (2024, p.1030), avaliaram a recuperação do café após a ocorrência de geada de plantios de café com diferentes idades e áreas de risco climático, estes utilizaram três áreas experimentais com diferentes tempos de plantio dos cafeeiros (um ano, dois anos e oito anos). Cada área foi dividida em zonas de risco climático de alto (parte inferior do terreno) e baixo risco (parte superior do terreno). As variáveis da planta avaliadas em campo foram: números de nós por ramo, número de folhas com danos, número de flores por ramos, número de frutos por ramos, produtividade e danos por geada. Foram realizados voos sobre as áreas avaliadas com uma RPA para a captura de imagens multiespectrais e geração dos índices vegetativos. Os resultados indicam que é viável utilizar sensores e índices de vegetação para monitorar a recuperação de plantações de café afetadas pela geada, proporcionando a capacidade de mapear sua distribuição espacial. Eles observaram que plantios de dois anos de idade tem melhor capacidade de se recuperar dos danos da geada e cafezais de oito anos tem mais complexidade na resposta das plantas aos danos da geada.

Marin et al (2021, p.1847) avaliou o uso potencial de imagens multiespectrais obtidas por veículo aéreo não tripulado, para analisar e identificar danos causados por geadas em cafeeiros em zonas com diferentes favorabilidades climáticas, estes observaram que os índices

de vegetação tiveram uma forte relação e alta precisão com os danos causados pelo gelo. Entre os índices observados, o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) foi o que teve melhores desempenhos ($r = -0,89$, $R^2 = 0,79$, $MAE = 10,87$ e $RMSE = 14,35$). De forma simples, este estudo demonstrou que os sensores multiespectrais, pode fornecer um método rápido, contínuo e acessível para identificar e avaliar o gelo danos em plantas de café.

2.2 Agricultura de precisão e cafeicultura de precisão

A agricultura de anos atrás vem sendo substituída, por tecnologias e metodologias que possibilitam tomadas de decisões a grandes distâncias da lavoura, coleta de informações imediatas e assertivas, possibilitando ao produtor um planejamento eficaz das práticas agrícolas e da análise de sua produtividade, práticas estas como preparo do solo, fertilização, irrigação, monitoramento, planejamento amostral e análises dos índices de vegetação (SANTOS et al.,2021; SEGARRA et al., 2020;FARIA et al., 2019;MARIN et al., 2019).

A modernização agrícola exige atividades agrícolas que possibilitem ao grande e ao pequeno produtor a redução do seu tempo na lavoura e dos custos envolvidos no ciclo produtivo (PAVANI, 2022). Nesses processos as coletas de informações das plantas são importantes para apoiar as tomadas de decisões nos talhões agrícolas, sejam elas coletadas manualmente ou com suporte de agricultura de precisão, como em trabalhos de (SANTOS et al 2022, p.1318).

O avanço de sensores e aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), para a obtenção de informações de altura de planta e diâmetro de copa de plantas, pode maximizar a eficiência de planejamento de áreas agrícolas. Isto se deve ao fato de que essas tecnologias são responsáveis pelo imageamento com alta resolução espacial e temporal, além do seu manuseio remoto, o que dão a esta operação as vantagens de apresentarem menor complexidade, facilidade de implantação e flexibilidade para repetidas missões (LALIBERTE et al., 2011; RANGO et al., 2006).

As práticas de agricultura de precisão se estendem a diferentes práticas, a criação recente destes sensores para utilização emRPAs oferece possibilidades aprimoradas para aplicações remotas de informações da cultura ou do ambiente (BERNI et al., 2009; LALIBERTE et al., 2011). Esses sensores de imagem podem fornecer informações fenotípicas adequadas para diversos propósitos, como apoiar a agricultura de precisão em diferentes culturas (PRIMICERIO et al. 2012; TATTARIS; REYNOLDS E CHAPMAN, 2016).

Santos et al (2021, p.1697) utilizaram ferramentas multiespectrais com o intuito de analisar a eficácia de índices de vegetação de lavouras cafeeiras, onde concluíram que as imagens apresentaram acurácia de 85%. Por outra perspectiva, Gonçalves (2018) usaram uma câmera Sony EXMOR 1/2.3" (RGB) para avaliar a altura de plantas cafeeiras e observou que certamente é uma ferramenta eficaz e de cunho profissional para avaliar a altura de cafeeiros, visto que a acurácia para a obtenção de medidas indiretas foram de 80%, onde mostraram eficácia na utilização da ferramenta.

SÁ et al. (2021, p.161978), utilizaram ferramentas de agricultura de precisão para geração de modelos de classificação supervisionada para a análise da cobertura de solo e cobertura de plantas cafeeiras, através de dados obtidos por sensores e RPAS, contudo existem pouco estudos que apresentam a eficácia do sensor LiDAR, para medições em áreas agrícolas ou áreas atingidas por geada, e especificamente na cafeicultura existe um grande espaço vazio de informações que correlacione o sensor LiDAR a plantas cafeeiras.

2.2.1 Sensor LiDAR

Atualmente as ferramentas para obtenção de dados para análises em áreas cafeeiras são diversos, abrangendo desde câmeras com alta resolução, sensores do tipo radar e RPAs. Os equipamentos do tipo radar, como por exemplo, o LiDAR (*Light Detection and Ranging*), vem emergindo no mercado possibilitando a coleta de informações em diversas áreas, como obtenção da altura de edificações, dimensões de árvores florestais ou atividades militares (GIONGO et al. 2010, p.1; SIEPMANN 2006). Outros autores classificam a tecnologia LiDAR como laser ou sistema de varredura a laser (CENTENO; MITISHITA 2007, COELHO; VARGAS, 2007; CASTRO e CENTENO 2005 e SILVA; RIBAS, 2007). Conforme Giongo et al.(2010) a tecnologia LiDAR utiliza informações semelhantes às tecnologias RADAR, entretanto o LiDAR encontra os objetos de interesse por meio da emissão de pulsos a laser até o objeto, o que facilita a obtenção de informações a longas distâncias, assim o autor afirma que a tecnologia foi inicialmente prevista para a utilização em levantamento de dados para a elaboração de mapas planialtimétricos de terreno, visto que as técnicas de obtenção de informações manualmente não eram totalmente representativas e demoradas.

Para Colasso et al. (2015, p.150) e Mengue, (2018) as informações de dimensões de estruturas como dossel de plantas são de grande valia para identificar e aprimorar as tomadas de decisões em áreas florestais e para a agricultura por meio de imagens de satélite ou as

fotografias aéreas podendo mapear o terreno embaixo das árvores. Para a cafeicultura, existem ainda muitos desafios, e um longo caminho a ser explorado, em análises e testes para apresentar a eficácia do sensor LiDAR para a cafeicultura de precisão (CP). A utilização deste sensor e o desempenho do sensor LiDAR é de interesse, visto que o Brasil vem crescendo em plantios cafeeiros (ABREU et al., 2023, p.1222).

Uma das características dos sensores de pulsos como o LiDAR, é a possibilidade de coleta de dados em períodos noturnos, não gerando interferência em função de baixas iluminações conforme discutido por Wagner et al., (2004), p.201 o que pode ser uma alternativa nos monitoramentos cafeeiros. Uma parcela de produtores rurais nas regiões brasileiras que realizam práticas noturnas tais como colheita mecanizada, o que possibilita ao produtor um monitoramento intensivo, visto que tal tipo de colheita, segundo Santinato et al. (2015), p.1215 pode ocasionar danos aos ramos da planta cafeeira.

Conforme Xiang et al. (2010), p.42 o sensor LiDAR pode ser uma excelente ferramenta por ser um scanner a laser compacto, baseado em um par de atuadores piezoelétricos amplificados e com linearidade da varredura, estas características podem ser valiosas para processos no meio agrícola. Para áreas cafeeiras este sensor pode se tornar uma ferramenta útil para coleta de informações, uma vez que por muitas destas áreas são caracterizadas por apresentarem relevos declivosos e de difícil acesso.

Os benefícios dos dados obtidos por LiDAR para o monitoramento de ambientes florestais na obtenção de altura de plantas foram bem definidos para análise de dossel de plantas por Brown et al., (2018), p.671. No entanto, com a complexidade estrutural e as interações únicas entre os modelos gerais florestais, podem não ser transferíveis para outras culturas agrícolas, como o café.

Para Karp et al (2018), p.236 a utilização do sensor LiDAR modelo LSM 200, apresentou resultados interessantes, o sensor foi acoplado a um trator lateralmente para obtenção de informações de plantas perenes onde apresentaram baixas correlações na criação de mapas laterais de plantas perenes. A partir dos dados coletados, os autores obtiveram mapas de volume, altura e porosidade de plantas. Os resultados de dependência espacial obtidos na análise geoestatística foram baixos, e as maiores correlações entre os mapas gerados foram obtidas na relação entre altura e volume de planta dentro da mesma época de coleta, com valores de 0,66 na colheita e 0,75 na floração.

Nishiwaki et al (2022), p.505 constataram que este equipamento possui precisão satisfatória nas medições da estrutura de árvores, o que tem contribuído para a compreensão dos ecossistemas florestais, bem como para o fornecimento de dados necessários para a

investigação de propriedades biofísicas da floresta, o estudo apresentou varredura a laser e suas diversas classificações, uma delas baseia-se na plataforma onde o scanner está instalado, o laser scanner terrestre, que pode ser usado em uma base fixa ou móvel na superfície terrestre. Em escala refinada, a estrutura tridimensional das árvores pode ser detectada pelo LiDAR, e assim se obter importantes informações de traços de espécies vegetais, bem como permitir sua identificação. Ainda, a medição de atributos florestais promovida pelos diferentes tipos de LiDAR tem fornecido dados consistentes de biomassa e carbono florestais.

Pagliai. et al.(2022), p.389 testaram um algoritmo automatizado usando informações do sensor LiDAR na avaliação do volume do dossel em condições operacionais de um trator em trabalho para avaliação de plantas frutíferas. Estes autores encontraram o volume de planta baseado em LiDAR correlacionando com duas medições manuais do volume do dossel (volume da fileira de árvores e nuvem de pontos). Os resultados encontrados pelos autores mostraram boas correlações entre as medidas manuais e LiDAR tanto para os volumes totais do dossel que foram R^2 0,67 e 0,56, já para o volume parcial do dossel o R^2 foi igual a 0,74.

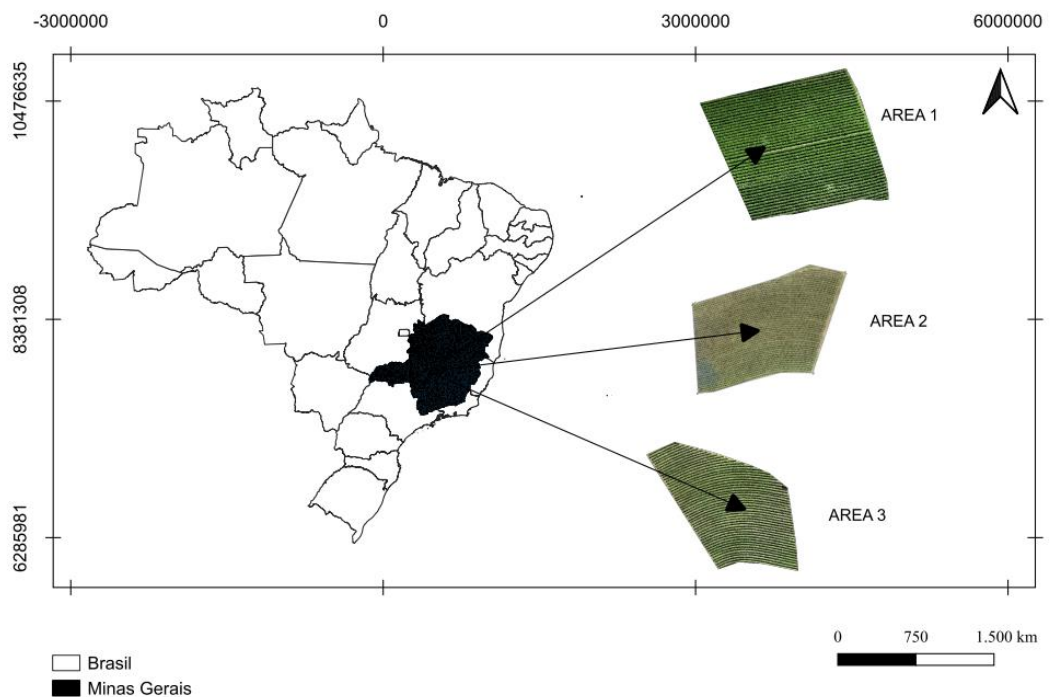
Moorthy et al. (2011), p.204 estudaram a obtenção de parâmetros biofísicos de árvores de Oliveiras com sensor ativo LiDAR (*Light Detection And Ranging*),e encontraram uma subestimação de altura de planta por meio do LiDAR, principalmente para árvores que tinham diâmetro de copa maior que 2 m, os autores atribuíram esta subestimação ao efeito de sombreamento, na qual obstruía a captação de dados pelo sensor, a sombra nas imagens, ou as variações de luminosidade podem interferir e causar estas subestimativas.

Com isso, verifica-se que existem trabalhos na literatura aplicando a tecnologia em algumas culturas perenes, porém não se encontram trabalhos desenvolvidos para cafeicultura. Logo se vê a necessidade de ampliar os estudos e contribuir para o desenvolvimento da cafeicultura de precisão (CP) agregando ainda mais valor para a esta cultura, pois a utilização do sensor LiDAR e para o imageamento de áreas cafeeiras pode-se obter produtos rápidos, de alto valor tecnológico e com grande precisão, desde que tenha uma metodologia correta para sua utilização e análises dos dados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente experimento foi conduzido na zona rural da cidade de Santo Antônio do Amparo, na fazenda Bom Jardim, situada no ponto de confluência entre o sul e o oeste de Minas Gerais, Brasil, sendo utilizadas 3 áreas distintas, descritas na Figura 1 e na Tabela 1.

Figura 1 - Localização das áreas cultivadas na Fazenda Bom Jardim, onde foram coletadas as informações do presente estudo.



Fonte: autora (2025)

Tabela 1 - Resumo das principais características das áreas em estudo.

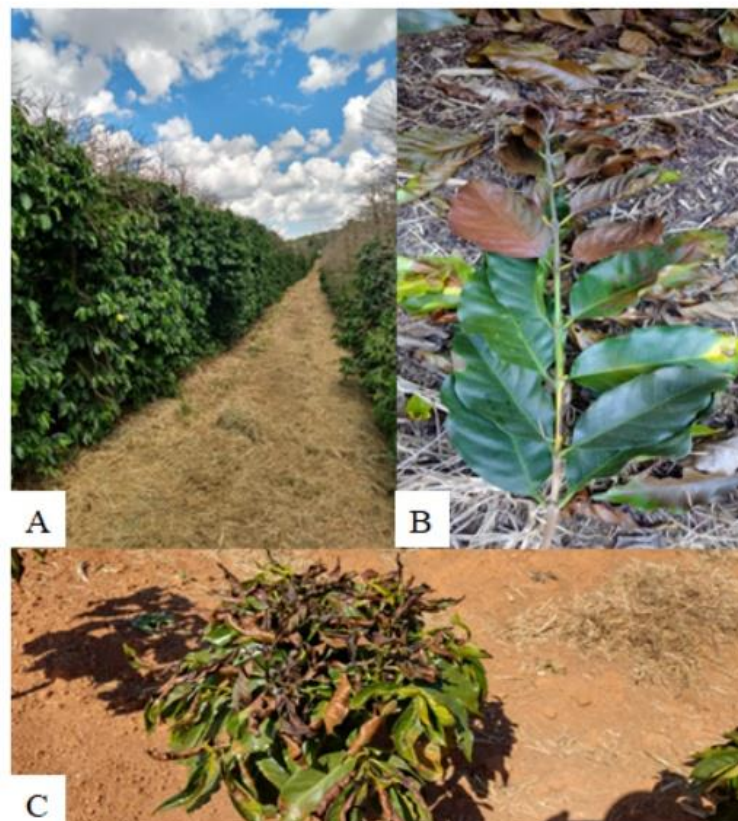
Talhão	Variedade	Coordenadas (UTM, sirgas 2000)	Altitude média (m)	Area (ha)	Ano do Plantio	Número de ocorrência de geadas
Area 1	Catucaí vermelho IAC 144	7677527.305288N e 603932.761361W	926	3,56 ha	2013	2
Area 2	Catucaí vermelho IAC 144	508019,6N e 7676692,0 W	932	3,52 ha	2019	1
Area 3	Catucaí vermelho IAC 144 e Arara	508093,6N e 7676753,1W	935	2,10 ha	2020	1

Fonte: autora (2025)

Na área 1, o plantio foi realizado em 21 de dezembro de 2013, sendo os cafeeiros plantados no espaçamento de 0,70 metros entre plantas e 3,10 metros entre linhas. Nas áreas 2 e 3 o espaçamento adotado era de 0,5 metros entre plantas e 3,5 metros na entrelinha . A idade das plantas, foi determinada de acordo com o tempo entre a data de plantio e a ocorrência da coleta de dados realizadas neste experimento, correspondendo a 3, 4 e 10 anos.

O solo das áreas foi caracterizado como latossolo vermelho-amarelo distrófico. A área 1 em estudo foi afetada por geadas em dois períodos distintos, nos anos de 2019 e 2021, e as áreas 2 e 3 apenas sofreram com a geada do ano de 2021. Portanto, a população de plantas destas áreas foi afetada por este evento climático e desta forma, sofreram danos, que foram comprovadas e classificadas pelos trabalhos de Marin et al. (2021) e Valente et al. (2024). Além disto os danos são demonstrados na Figura 2.

Figura 2– Registros das lavouras afetadas pela geada nos anos 2021, área1 (A), área 2 (B), área 3 (C).



Fonte: autora (2025)

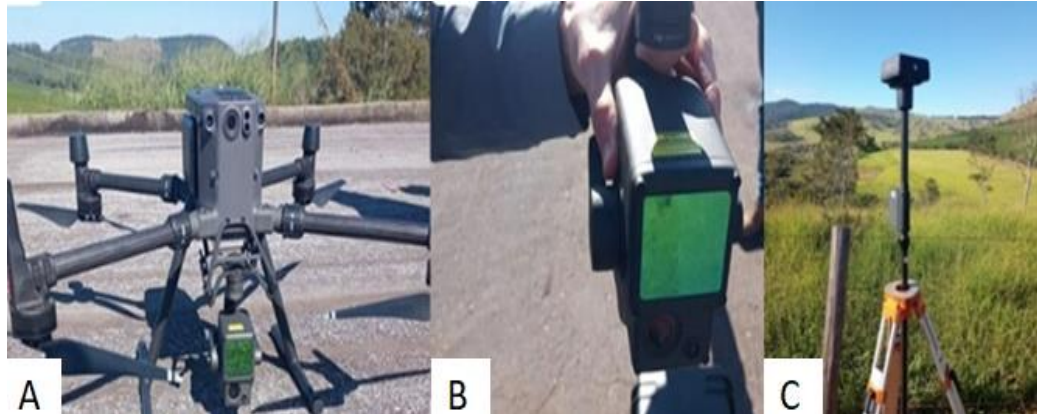
Os dados de temperatura ambiente foram coletados por uma estação meteorológica automática, localizada na fazenda. A geada de 2019, ocorreu nos dias 8 e 9 de julho deste ano

e as temperaturas mínimas observadas nesses dias foram de 1,8 e 0,3 °C. No ano de 2021, a geada ocorreu em 20 de julho, sendo sua temperatura mínima observada de -1,7°C.

Para este estudo, considerando as áreas analisadas, foram definidos estatisticamente dois métodos distintos de agrupamento. O primeiro agrupamento (Agrupamento 1) inclui análises baseadas na altura das plantas e no diâmetro da copa. Já o segundo agrupamento (Agrupamento 2) abrange análises que consideram a altura das plantas, o diâmetro da copa e a altimetria. Para cada agrupamento proposto foi realizada a classificação das plantas de cafeeiros de acordo com que foram afetadas pela geada, gerando assim dois grupos, denominados de grupo 1 e grupo 2, plantas mais e menos afetadas, respectivamente.

Em 21 de maio de 2023, foi realizado um voo com uma RPA embarcada com um sensor LiDAR nas áreas em estudo para obtenção de dados das plantas cafeeiras de cada uma das 3 áreas em estudo. Para tal, foi utilizando uma RPA do tipo quadricóptero, da marca DJI modelo Matrice 300 com sistema de posicionamento global RTK (Figura 3a). Esta RPA apresenta 55 minutos autonomia de voo, sistema de detecção e posicionamento em seis direções, sistema de transmissão aperfeiçoado e câmbio de frequência automática em tempo real entre as faixas 2,4 e 5,8 GHz, resultando em uma maior estabilidade de voo em áreas com alta taxa de interferência, como linhas de transmissão. Nesta RPA foi embarcado um sensor Zenmuse L1 (Figura 3b), caracterizado com um módulo Livox LiDAR, um sistema de navegação inercial (IMU) de alta precisão e uma câmera RGB de 20 MP com um sensor CMOS de 1 polegada, distância focal de 8.8 mm e obturador mecânico, acoplados em um gimbal com estabilidade nos 3 eixos. Para garantir maior precisão na realização dos voos e do georreferenciamento das informações obtidas pelo sensor LiDAR, foi utilizada uma antena GNSS, que consiste em uma base RTK L1 e L2 integrado a RPA e outra base fixa ao chão para a correção DRTK-2 da DJI.

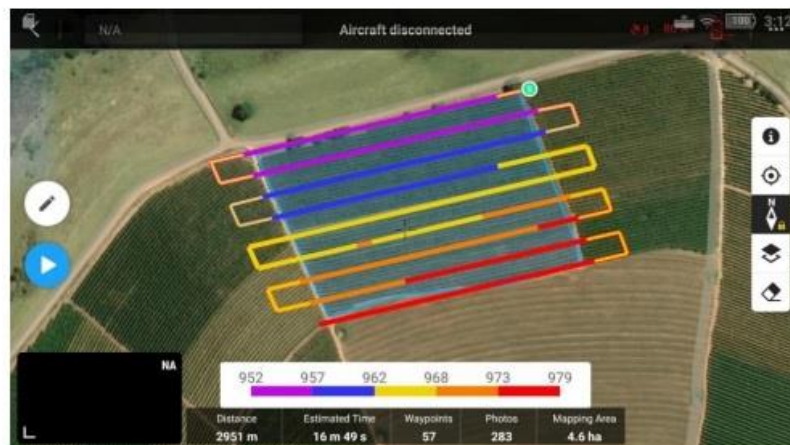
Figura 3 - RPA Matrice 300 RTK (a) e sensor Zenmuse L1 (b) Base fixa ao chão para a correção do sinal do GNSS, modelo DRTK-2 da DJI (c).



Fonte: autora (2025)

Antes de se iniciar o voo, foram definidos os parâmetros como altitude de voo de 75m com relação ao solo, área de cobertura, velocidade de 4,1m/s. O levantamento das imagens foi realizado a partir do aplicativo *DJI Pilot 2* (Figura 5), utilizando uma densidade de nuvem de pontos 685 pontos/m²; um GSD 0,96 cm/pixel; sobreposição lateral (LiDAR) 50%; uma sobreposição frontal LiDAR (visível) de 70%, uma sobreposição lateral LiDAR (Visível) 61%; uma margem 10 metros ao redor da área estudada para o planejamento de voo, garantindo a área de interesse estivesse bem coberta. Além disto, uma taxa de amostragem 160 kHz foi escolhida para garantir que as imagens e os dados coletados pudessem apresentar alta qualidade e atendessem aos objetivos esperados.

Figura 5 - Plano de voo realizado no app DJI Pilot 2.



Fonte: autora (2025)

3.1. Processamento de dados obtidos pelo sensor LiDAR

Durante o alinhamento das imagens foi gerada uma nuvem de pontos esparsa por meio de pontos homólogos identificados automaticamente no processo. Posteriormente, foi realizada a densificação da nuvem de pontos que foi gerada no processo anterior, aumentando a quantidade de pontos na nuvem e diminuindo os espaços vazios. Por último, foi confeccionado o ortomosaico, nesta fase, é realizada a ortorretificação das imagens onde estas são reprojctadas ortogonalmente e com a escala constante, de modo a eliminar ou minimizar as distorções provocadas pelo sistema sensor e pela superfície.

Com as imagens devidamente corrigidas, o software realiza a mosaicagem e cria um único produto. O levantamento gerou nuvens de pontos LiDAR georreferenciadas no formato (.las), cujos dados foram processados no software DJI Terra. As nuvens de pontos foram georreferenciadas usando-se as informações obtidas pelo sensor e pela precisão do RTK da RPA e da base estacionária. Após a coleta dos dados a partir do sensor LiDAR, corrigiu-se a referência espacial geográficas para ortométricas (Sirgas 2000 UTM; zona 23S). A metodologia de correção adotada das imagens foi por triangulação, a nuvem de pontos foi classificada automaticamente e em seguida, manualmente para definição de pontos representantes do terreno. O ortomosaico foi georreferenciado com base no RTK, garantindo uma precisão de 0,02 milímetros. A partir destes, foram gerados o modelo digital da superfície (MDS) e o modelo digital do terreno (MDT).

Os próximos passos envolvem a realização de análises no software QGIS para a obtenção de informações de cada planta georreferenciada, utilizando dados do sensor LiDAR e da base RTK. Por meio do geoprocessamento no QGIS, foram determinados os diâmetros de copa e a altura das plantas. A obtenção das alturas das plantas foi realizada por meio das ferramentas raster, considerando a diferenciação entre os Modelos Digitais de Superfície (MDS) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT), gerados a partir do processamento dos dados do sensor LiDAR. As medidas do diâmetro de copa foram obtidas por meio das ferramentas de medição vetorial do software QGIS. O diâmetro de copa das plantas foi determinado diretamente no ortomosaico, sendo medido ao longo do maior eixo central na horizontal, utilizando a ferramenta régua para medição de distâncias em unidade métrica. Para a variável volume da planta, foi proposto o cálculo com base nas informações de diâmetro de copa e altura da planta cafeeira, utilizando a equação de um cilindro (Equação 1). Essa abordagem foi adotada devido à semelhança das plantas com uma estrutura cilíndrica, conforme observado na Figura 6.

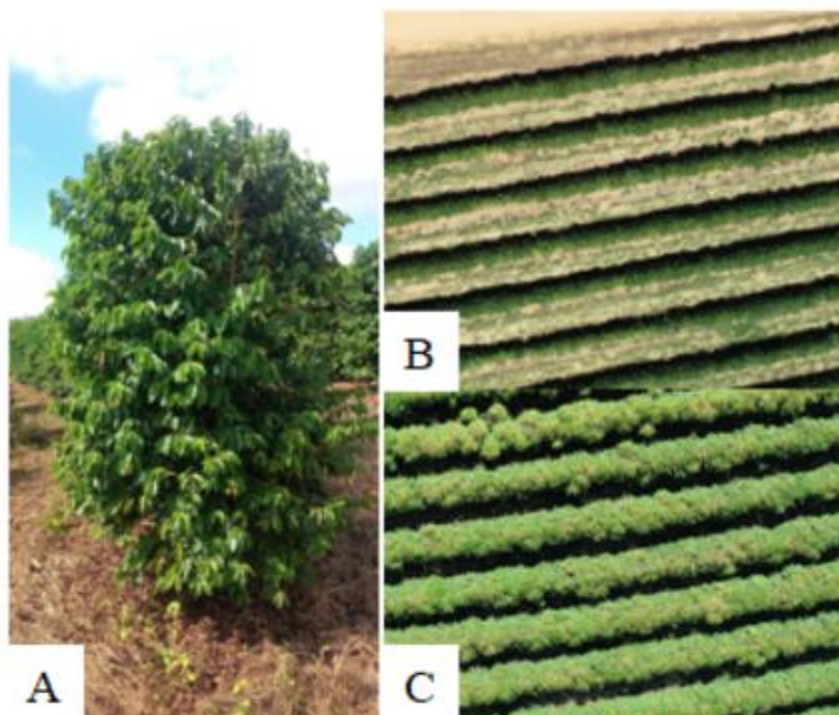
$$V= 3.1415 \cdot R^2 \cdot H \quad (1)$$

Onde:

R = raio

H =altura de planta

Figura 6 -Exemplar de cafeeiro encontrado a campo, área 1(a),vista superior de plantas da área 2 (b), vista superior de plantas da área 3 (c).



Fonte: autora (2025)

A estrutura da planta seguindo uma forma cilíndrica, pode ser explicada através da colheita mecanizada, pois esta pode ocasionar deformações nos ramos da planta, modificando assim o formato estrutural da planta cafeeira (OLIVEIRA et al., 2007).

O índice de área foliar (IAF) foi calculado conforme a equação 2 desenvolvida por Favarani et al. (2002) e descrita por Santos et al. (2022) e Gonçalves (2018).

$$IAF = 0,0134 + 0,7276 \cdot D^2 \cdot H \quad (2)$$

Em que:

D = diâmetro de copa da planta;

H = altura da planta;

As informações altimétricas do terreno foram obtidas por meio das ferramentas rasters, através da extração de informações dos modelos digitais de terreno, extraído do processamento dos dados LiDAR e o geoprocessamento do software QGIS, conforme já descrito.

3.2 Análises Estatísticas

No presente estudo, foi realizada a análise de agrupamentos não hierárquicos. Nos agrupamentos hierárquicos, o intuito é identificar os possíveis agrupamentos a partir dos dados. Já nos agrupamentos não hierárquicos, procura-se otimizar um critério de agrupamento mediante o número de grupos informados previamente pelo pesquisador, sendo que esta escolha precisa ter um embasamento. O método das k-médias (*k-meansmethod*) foi proposto por Lloyd (1982) e é um método iterativo que minimiza a soma das distâncias euclidianas entre os objetos e os centros de cada grupo, os chamados centroides. Partiu-se do princípio da existência prévia de dois grupos de plantas nas áreas estudadas: aquelas mais afetadas e aquelas menos afetadas pela geada, conforme pode ser observado nos trabalhos de Marin et al., (2019) e Valente et al.,(2024).

Assim, o presente trabalho propõe analisar e comparar esses grupos por meio de uma nova abordagem de segmentação, utilizando o método *k-means* de agrupamento não hierárquico, com o número de agrupamentos definido como 2. Desta forma, o para o desenvolvimento do Agrupamento 1 foram utilizadas as variáveis altura de planta e diâmetro de copa de planta obtidos pelo sensor LiDAR. Já para o Agrupamento 2, as variáveis consideradas foram altura de planta, diâmetro de copa e altimetria da área em estudo, também obtidas pelo sensor LiDAR. Considerou-se o nível de 5% de significância. Para as análises dos dados foi utilizado o software R Core Team (2023).

Com o intuito de comparar as médias das variáveis entre os Grupos 1 e 2 de cada agrupamento e identificar as plantas mais e menos afetadas pela geada nas três áreas analisadas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Essa análise permitiu comparar

as variáveis alturas de planta, diâmetro de copa, volume de planta e Índice de Área Foliar (IAF) entre os grupos definidos, utilizando o método de agrupamento não hierárquico k-means. A análise de variância (ANAVA) foi utilizada para comparação das médias dos tratamentos (grupo 1 e grupo 2) de cada variável em estudo. A hipótese nula do teste F é de que as médias são iguais e a hipótese alternativa é que ao menos uma média difere entre os tratamentos. Nos casos em que a hipótese nula foi rejeitada, o teste de Tukey para comparação de médias não foi necessário, visto que são somente duas médias e, neste caso, a comparação já é completa com o resultado do teste F da ANAVA. A análise de variâncias requer alguns pressupostos, são eles: resíduos seguirem uma distribuição normal, possuírem variâncias homogêneas e serem independentes. No presente estudo, foi considerada a independência dos erros, a qual é garantida pelo princípio da casualização, a qual é assegurada pela amostragem aleatória dos dados. Assim, foram verificadas a normalidade e a homogeneidade de variâncias dos resíduos, para a correta aplicação da análise de variâncias. A normalidade dos resíduos é verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, cuja hipótese nula é que os dados estão normalmente distribuídos. Já a homoscedasticidade das variâncias é testada por meio do teste de Bartlett, cuja hipótese nula é de que as variâncias são iguais.

Por fim, foram desenvolvidos mapas em softwares SIG obtidos por meio dos resultados obtidos pela análise de agrupamentos não hierárquica (agrupamento 1 e agrupamento 2), para identificação dos grupos classificados em cada agrupamento (grupos 1 e grupo 2), plantas mais ou menos afetadas, pela geada. Assim foi possível observar e comparar com o método proposto por Marin et al., (2021), que leva em consideração apenas a altimetria da área e aspectos de classificação visual de danos, com a metodologia desenvolvida no presente estudo, que propõe a classificação baseando em análises estatísticas, através de informações das plantas cafeeiras, entre eles altura de planta, diâmetro de copa e altimetria da área baseados em dados obtidos por LiDAR.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico estão apresentados os resultados das análises realizadas para as áreas 1, 2 e 3, por meio do agrupamento não hierárquico.

4.1 . Área 1

As análises descritivas das variáveis alturas de planta e diâmetro de copa de plantas cafeeiras foram utilizadas como base para o agrupamento não hierárquico. As observações

originais são compostas por 3981 plantas de uma população de plantas cafeeiras observadas na área 1 em estudo. Foram realizadas análises para dois agrupamentos, sendo o (agrupamento 1) aquele que compreende o estudo de 2 variáveis, e o (agrupamento 2), com 3 variáveis, como apresentado na metodologia. Os valores discrepantes (outliers) foram retirados conforme a metodologia adotada. Assim, os dados considerados no estudo, continham 3808 plantas cafeeiras. Foi utilizada uma a margem de erro de 5% e 95% de confiança para os dados da população.

As análises descritivas das variáveis altura de planta e diâmetro de copa, volume de planta e índice de área foliar de plantas cafeeiras, utilizadas nas análises, são apresentados na Tabela 2. Apresentando assim uma análise descritivas dos dados agrupados.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos agrupamentos com 2 e 3 variáveis para a área 1.

	Grupo	Diâmetro de copa	Altura de planta	Volume de planta	IAF
Agrupamento 1	1	1,79	2.63	7.49	0.0930
	2	1.84	2.78	8.24	0.1023
Agrupamento 2	1	1,79	2.63	7.49	0.0930
	2	1.84	2.78	8.24	0.1023

Fonte: autora (2025)

As observações do diâmetro do grupo 1 da população das plantas cafeeiras na área estudada apresentou valores médios 1,79 metros e para o (grupo 2), apresentou valores médios de 1,84 m. Para a variável altura de planta, os valores médios observados foram, para o (grupo 1), 2,63 metros e para o (grupo 2), 2,78 metros.

Conforme Souza et al.,(2006, p.41), as plantas de 10 anos observadas em seu estudo, se encontravam em estágio de desenvolvimento mais avançado, assim sendo, mais velhas e apresentaram valor maior de altura de planta, de comprimento e de número de galhos. Os autores encontram valores de 2,30 metros para plantas nesta idade.

A altura de plantas se torna uma ferramenta interessante para diferentes estudos, conforme (Barbosa et al.,2012), a altura de plantas possibilita a determinação de diferentes modelos, entre eles o de predição de produtividade do cafeeiro e do índice de área foliar da população.

Para as observações da variável volume de planta na área 1, os valores médios encontrados para o (grupo 1) no presente estudo, foram, 7,49m³ e para o (grupo 2), 8,24m³. O

que possivelmente pode explicar vestígios de plantas afetadas pela geada. Visto que a geada tem a capacidade de reduzir a área foliar da planta, pelo necrosamento, ocasionando assim reduções em seu desenvolvimento. Ao avaliar os dados, é possível identificar que as plantas com maior presença de efeitos da geada, após a sua ocorrência, são as plantas compreendidas pelo grupo 1 regiões essas identificadas e validadas a campo no período da ocorrência das geada em 2019 e 2021 pelos trabalhos de Marin et al (2021) e Valente (2024).

Conforme Valente et al., (2024) a seleção de locais de plantio que evitem áreas baixas propensas ao acúmulo de ar frio se apresenta uma estratégia eficaz para mitigar riscos. Além disso, a implementação de medidas de proteção, como a cobertura das plantas durante períodos de geada, pode proteger os brotos reprodutivos e auxiliar a planta na recuperação, reduzindo a necessidade do produtor em renovar o cafetal.

Durante o inverno, a ocorrência de temperaturas extremamente baixas é uma limitação considerável para a agricultura, especialmente para o café, na região sul de Minas Gerais. As temperaturas no local frequentemente atingem 0 °C e, às vezes, abaixo de zero, possibilitando a formação de geada e, conseqüentemente, danos às plantas de café. Além disso, devido às condições topográficas, a formação de geada é favorecida, isto porque esta região possui locais com altitudes elevadas e terrenos mais baixos (baixadas) (DAMATTA et al., 2006; CARMARGO, 2001; ROSISCA, 2015). A avaliação visual dos danos é um método simples e rápido, porém, sua precisão pode ser limitada e de alto custo, devido à mão de obra no campo, que a cada ano agrícola é reduzido e devido uma vez que os sintomas podem não ser uniformes em toda a plantação (MARIN et al., 2021, p.1845).

Para as observações do índice de área foliar (IAF), os valores médios encontrados para o (grupo 1), foram 0,930 e para o (grupo 2), foram 0,1023. Além disso, o IAF é relevante em estudos de interesse de conhecimento de fenômenos em diferentes escalas, como da folha ao dossel, fornecendo informações importantes para a identificação de modelos de base fisiológica, e também o conhecimento dessa variável é necessário para identificação e a validação de dados de produção, cobertura vegetal e fotossíntese da planta (BARROS et al., 1973; LUNZ, 2006; SASAKI et al., 2008; WATSON, 1952).

Foi também realizado o agrupamento 2, sendo encontrado, tanto para os grupos dos agrupamentos 1, quanto para os agrupamentos 2 (considerando 3 variáveis), os valores de diâmetro de copa, altura de planta, volume do cafeeiro e IAF foram os mesmos. A partir da análise dos valores médios das variáveis estudadas das plantas cafeeiras da área 1, foi possível verificar que existe pouca variação nos dados, porém somente esta observação não é suficiente para saber quais são os locais onde se encontram os extremos, maiores e menores

valores. Desta forma, é necessário utilizar outras alternativas como o agrupamento não hierárquico.

Os dados apresentados na Tabela 2 permitem comparar os dois agrupamentos experimentais propostos. Ambos os agrupamentos incluem o estudo de dois grupos de plantas. Observa-se um aumento progressivo do diâmetro de copa, para ambos os grupos nos dois agrupamentos em investigação. O mesmo comportamento ocorre com a altura das plantas, assim como com o volume calculado das plantas, que se manteve o mesmo em ambos os grupos. A coluna referente ao IAF apresenta valor fixo para o grupo 1 em ambos os agrupamentos, além de se preservar também para o grupo 2 em todos os agrupamentos. A estabilidade destes parâmetros nos subgrupos pode refletir fatores ambientais ou metodológicos compartilhados entre esses grupos.

Esta pesquisa fornece uma base valiosa para a tomada de decisões informadas e a adoção de práticas que visem minimizar os danos causados pela geada, aumentando assim a eficiência da produção de café.

4.1.1. Análise de variância para os agrupamentos 1 e 2

Para cada variável em estudo das plantas cafeeiras da área 1, obteve-se a análise de variância para comparação das médias dos grupos para cada variável em estudo, onde observou-se os mesmos resultados para os agrupamentos 1 e 2 respectivamente com 2 e 3 variáveis, considerando o nível de 5% de significância. A hipótese nula (H_0) a ser testada é de que as médias são iguais e a hipótese alternativa (H_1) é que ao menos uma média difere entre os tratamentos.

- **Diâmetro de copa**

Ao nível de 5% de significância, o Teste de Shapiro-Wilk rejeita a hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos (valor $p = 1,477974e^{-19}$) e o Teste de Bartlett rejeita a hipótese de homogeneidade das variâncias (valor $p = 0,03633143$), violando os pré-requisitos para a análise de variância. Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como os pressupostos da análise de variância não foram atendidos e não foi possível obter uma transformação nos dados, foi realizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, cuja H_0 é a afirmação de que as medianas são iguais. Como valor $p = 0,9652$, não se rejeita a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, há indícios

estatísticos para afirmar que as medianas dos diâmetros de copas não diferem entre os Grupos 1 e 2.

- **Altura de planta**

Considerando a variável altura de planta, as suposições de normalidade dos resíduos e de homogeneidade das variâncias não foram atendidas (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 3,869496e^{-35}$ e Teste de Bartlett com valor $p = 1,840195e^{-12}$, respectivamente). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas das alturas de plantas diferem entre os grupos 1 e 2.

- **Volume de planta**

Ao nível de 5% de significância, o pressuposto de normalidade dos resíduos não foram atendidas (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 3,198028e^{-43}$). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p = 0,09593$ no teste de Mann-Whitney, não rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, há indícios estatísticos para afirmar que as medianas dos diâmetros de copa não diferem entre os grupos 1 e 2.

- **IAF**

Ao nível de 5% de significância, o pressuposto de normalidade dos resíduos não foi atendido (de Shapiro-Wilk com valor $p = 3,198028e^{-43}$). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p = 0,09593$ no teste de Mann-Whitney, não rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, há indícios estatísticos para afirmar que as medianas dos diâmetros de copa não diferem entre os grupos 1 e 2.

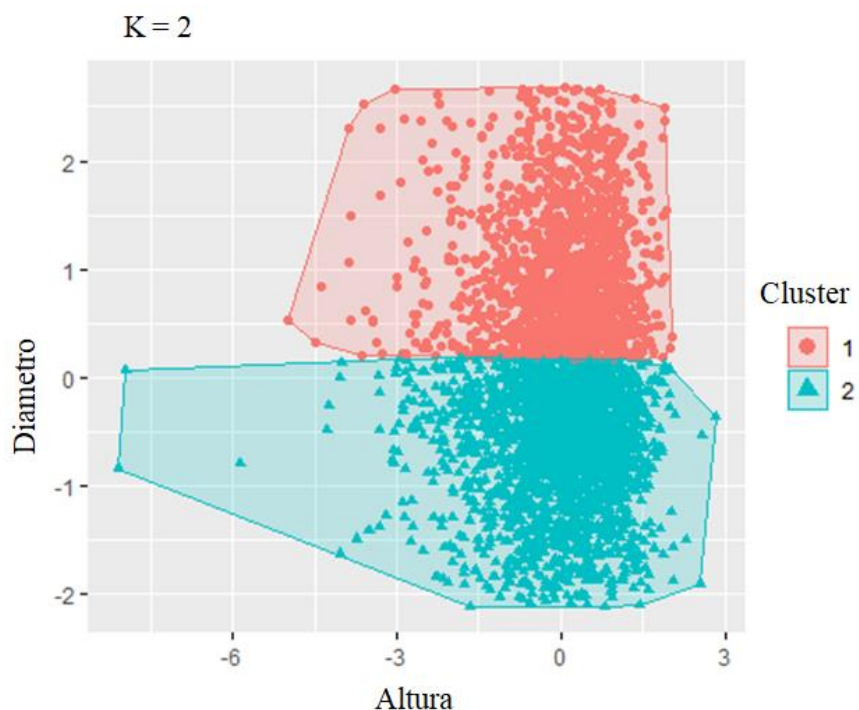
A partir da análise dos valores mínimos e máximos, e também da média da altura de planta e diâmetro dos cafeeiro, foi possível verificar que existe variação nos dados, porém somente o conhecimento desta amplitude não é suficiente para saber quais são os locais onde se encontram os maiores valores de altura de planta e diâmetro e os locais onde se encontram as menores alturas de plantas e diâmetros de cafeeiros. Desta forma, é necessário utilizar ferramentas outras alternativas como o agrupamento não hierárquico, para modelar a variabilidade espacial como confeccionar grupos, bem como realizar a confecção de mapas que possibilitem o gerenciamento das intervenções necessárias.

Análise do agrupamento 1

Como apresentado anteriormente, foi considerado o agrupamento das plantas em dois grupos e houve uma divisão nítida entre eles, como observado na Figura 7, na qual o (grupo 1) tem sua concentração na parte superior e, o (grupo 2) na parte inferior.

Na Figura 7 é possível observar seis valores numéricos distribuídos em dois clusters organizados ao longo de um único eixo. Os centroides calculados refletem essa estratégia de delimitação, baseada na altura e diâmetro das copas, priorizando a homogeneidade interna de cada cluster. Assim pode se afirmar que houve uma classificação bem clara do (grupo 1) em vermelho e do (grupo 2) em azul.

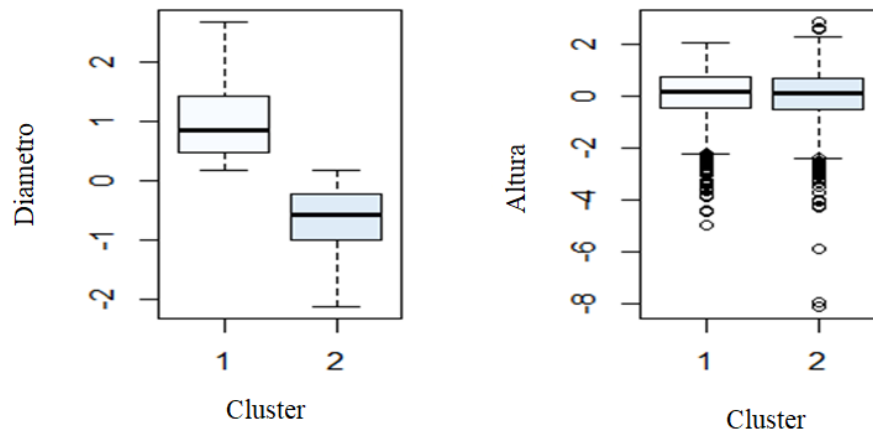
Figura 7 - Gráfico de dispersão com a clusterização realizada.



Fonte: autora (2025)

O grupo 1 foi formado por 1508 plantas cafeeiras, que corresponde a 39,60% de plantas cafeeiras no campo e o grupo 2, composto por 2300 plantas, que corresponde a 60,39% da totalidade de plantas cafeeiras no campo. Observa-se, na Figura 8, que o grupo 1 tem valores de diâmetro de copa superiores ao grupo 2. Já os valores de altura de planta são aproximados entre as observações que compõem o grupo 2.

Figura 8 - Gráficos boxplot das variáveis diâmetro de copa e altura de planta nos clusters.

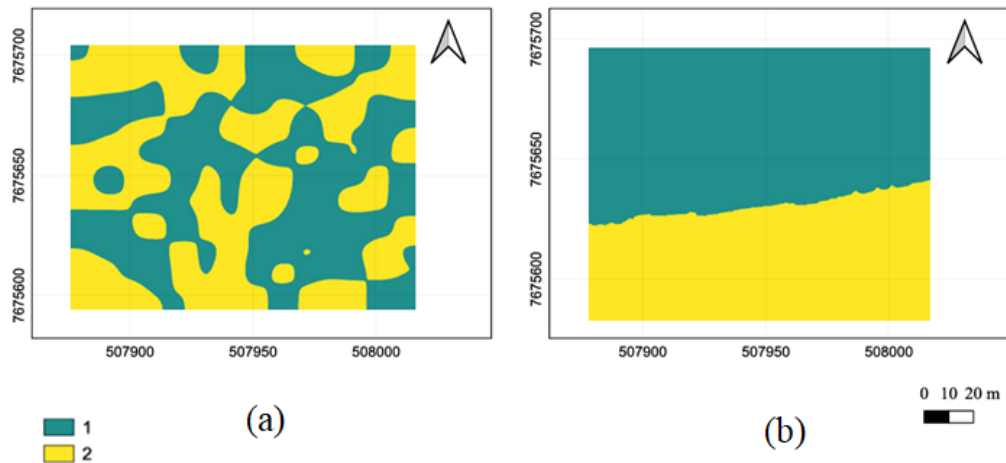


Fonte: autora (2025)

Zoneamento do agrupamento 1

As análises resultaram em um zoneamento, a partir do qual foi necessário após os resultados de uma análise de variância (ANOVA) com as duas variáveis em estudo, explicando o processo de classificação dos grupos 1 e 2, e validando essa separação. Com o intuito de avaliar a diferença estatística entre os (grupos 1) e (grupo 2). O valor $p < 2,2e^{-16}$ indica que existem indícios para se rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos, ao nível de 5% de significância. Então os grupos demonstram ser diferentes estatisticamente, podendo, assim, sugerir um perfil para esses grupos, como observado na Figura 9a.

Figura 9 - Mapas desenvolvidos pela metodologia deste trabalho segundo altura de planta e diâmetro de copa (a) e Mapa desenvolvido baseado na metodologia proposta por Marin et al., (2021) (b).



Fonte: autora (2025)

Na Figura 9a, pode ser observado o mapeamento proposto pela metodologia desenvolvida por este estudo, baseada no agrupamento 1 e sua comparação com o agrupamento da proposto pela metodologia de Marin et al. (2021) (Figura 9b). Observa-se que há uma diferença notável entre os dois mapas da Figura 9, como é visualizado pelas regiões em verde e amarelo. Na Figura 9a observa-se que é possível identificar com maior precisão as áreas que foram afetadas pela geada e permite a adoção de estratégias para a recuperação destas áreas com maior exatidão, levando em consideração que a identificação foi realizada com uma tecnologia de alta capacidade de obtenção de informações (Sensor LiDAR) e a análises estatísticas. A metodologia do estudo permitiu extrair informações das características das plantas: altura de planta e diâmetro de copa, possibilitando ao produtor o planejamento de estratégico de práticas agrícolas baseadas em características das plantas, altura e diâmetro. Dentre as práticas que podem se beneficiar com esta metodologia, pode-se citar, adubação, pulverização e aquelas necessárias para a recuperação da área plantada, ou mesmo um planejamento para recuperação do cafetal.

A metodologia desenvolvida neste estudo permitiu identificar diferentes regiões pertencentes aos (grupos 1) e (grupo 2), distinguindo áreas com maior e menor incidência de geada. Ao contrário da abordagem de Marin et al. (2021), que apresenta uma segmentação mais

homogênea, o método proposto levou em consideração as plantas como indivíduos únicos, agrupando-as com base na altura e no diâmetro da copa. Esse critério revelou a existência de zonas afetadas distribuídas de maneira irregular na área de estudo, evidenciando que o efeito da geada pode se manifestar de formas distintas e em diferentes locais dentro de uma mesma região. No entanto, as regiões indicadas para iniciar o planejamento de recuperação seriam as zonas em verde.

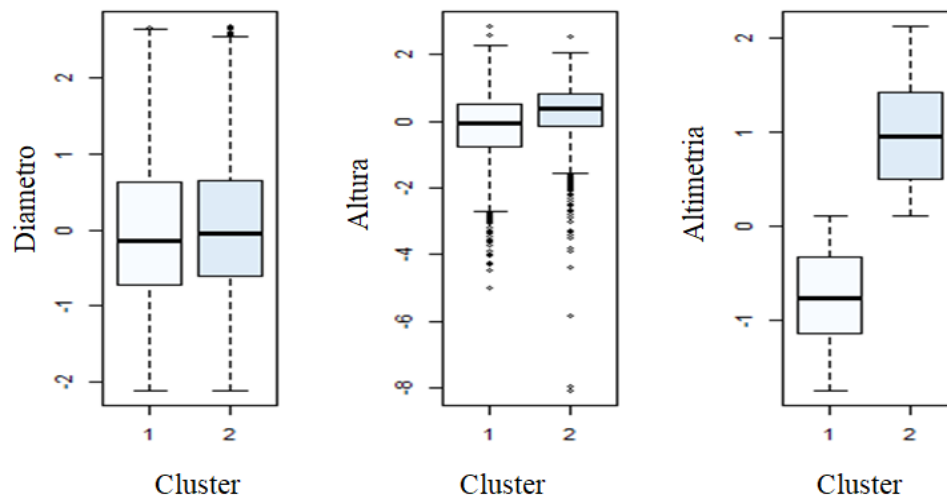
Análise do agrupamento 2

Para o (agrupamento 2), proposto com as variáveis diâmetro de copa, altura de planta e altimetria. Neste estudo foram considerados 3808 observações. Como observado na Figura 10, os grupos 1 e 2 têm valores medianos aproximados de diâmetro de copa e altura de planta, para o grupo 1 apresentou menores valores se comparado com o grupo 2.

Para as plantas de 10 anos de idade observou se que as plantas mais afetadas se localizaram nas regiões características de vales de baixadas. Conforme Alevato et al., (2019) destacam a influência crítica das características topográficas na delimitação de áreas suscetíveis a danos por geada. Essa suscetibilidade está intrinsecamente ligada a variáveis específicas do local, como limites mínimos de temperatura, fenologia da planta e altimetria.

O número de ocorrências de geadas também se torna um fator determinante na recuperação das plantas cafeeiras. De acordo com Souza et al.,(2011) com a disponibilidade térmica tem influência direta na fenologia das plantas. Temperaturas mais elevadas aceleram o desenvolvimento vegetal, enquanto que baixas temperaturas prolongam o ciclo. Se a oscilação térmica anual for acentuada, com inverno rigoroso, muitas espécies perenes entram em período de repouso (dormência), retornando ao ciclo vegetativo anual tão logo as condições térmicas se tornem adequadas.

Figura 10 - Gráfico boxplot das variáveis: diâmetro de copa, altura de planta e altimetria nos clusters

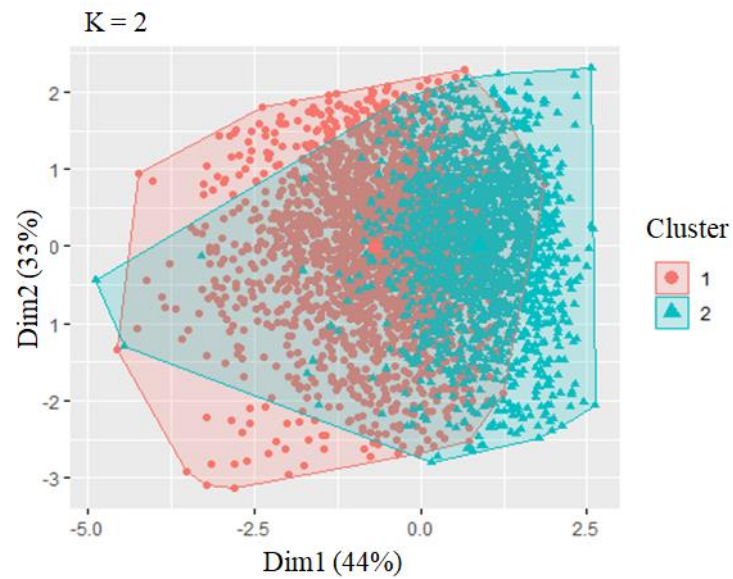


Fonte: autora (2025)

Na Figura 11, observa-se que o mesmo método foi aplicado para separar os grupos, mas agora com a utilização da variável altimetria no (agrupamento 2), como terceira variável. O novo espaço multidimensional gerado fez com que a separação dos clusters mudasse, mas mantendo-se a estrutura principal de divisão. A adição da variável altimetria apresenta um maior refinamento nos dados dos grupos, pois permite uma definição mais precisa das regiões convexas. Apesar disso a sobreposição dos clusters sugere uma relação complexa não explicada. Assim a adição da altimetria não mostrou ser um fator determinante, mas que reduziu a variabilidade interna dos grupos propostos.

A divisão não foi muito clara entre os grupos, como pode ser observado na Figura 11, o que pode ser explicado pela adição da variável altimetria. O grupo 1 é composto por 2146 observações, correspondente a 33% dos dados e, o grupo 2, por 1662 observações, correspondente a 44% dos dados. Na Figura 11, pode-se observar os resultados da análise de clusters ($K=2$) e a lacuna entre -2,5 e 0,0 indica uma separação clara entre os grupos, sugerindo um cluster nos valores negativos (ex: -5,0; -2,5) e outro nos positivos (0,0; 2,5). (KRIEGEL et al, 2009).

Figura 11 -Gráfico de dispersão com a clusterização realizada.

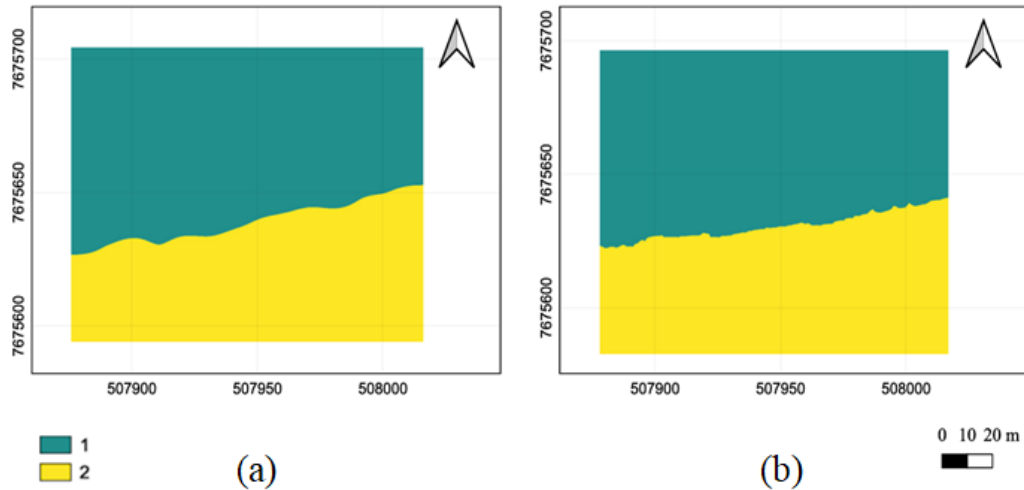


Fonte: autora (2025)

Zoneamento do agrupamento 2

Como apresentado realizou-se, em seguida, uma análise de variância (ANOVA, explicando o (grupo 1) e (grupo 2). O objetivo, neste caso, é testar se há diferença estatística entre os (grupos 1) e (grupo 2). O valor $p < 2,2e^{-16}$ mostra que houver indícios para se rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos, ao nível de 5% de significância. Então os grupos se demonstram ser diferentes estatisticamente, podendo, assim, sugerir um mapeamento para esses grupos, como foi proposto na Figura 12.

Figura 12 - Mapas desenvolvido pela metodologia deste trabalho segundo altura de planta, diâmetro de copa e altimetria (a) e Mapa desenvolvido baseado na metodologia proposta por Marin et al., (2021)(b).



Fonte: autora (2025)

Na metodologia proposta pelo estudo a partir da análise dos mapas dos grupos gerados pelo agrupamento não hierárquico das plantas cafeeiras a campo (Figura 11), observou-se que as características de altura de planta e diâmetro da população, apresentou maior semelhança quando adicionado a variável altimetria, na representação do mapa, comparado com a classificação proposta por Marin et al.(2021). Na classificação proposta por este trabalho (Figura 12a), observa-se uma diferença no limite que separa os (grupos 1) e (grupo 2), suavizando as fronteiras, quando se compara com a classificação proposta por Marian et al. (2021), mas mantendo um padrão aproximado entre elas.

Assim sendo, observa-se que a classificação realizada com os dados obtidos por meio do sensor LiDAR juntamente com o agrupamento não hierárquico indentificou as duas regiões, com plantas com maiores e menores incidência, semelhantes a classificação proposta por Marin et al.(2021). As regiões ao norte em verde, foram afetadas pela incidência da geada, e as regiões ao sul em amarelo, foram menos afetadas. Dessa forma, as regiões mais adequadas para iniciar o planejamento de manejos de recuperação seriam as zonas em verde, localizadas ao norte, em ambas as classificações.

4.2 Área 2

Conforme já apresentado para a área 2, foi proposta, para as plantas com 3 anos de idade, a análise das informações por meio de agrupamento não hierárquico. Para os resultados do agrupamento 1, foram consideradas duas variáveis: altura da planta e diâmetro da copa. Os dados utilizados no estudo totalizaram 4690 amostras, com margem de erro de 5% e nível de confiança de 95%, sendo classificados em dois grupos: grupo 1 e grupo 2."

Os agrupamentos 1 e 2, como observado na Tabela 3, não se mostraram diferentes para as análises descritivas. Entretanto comparando-se os grupos 1 e 2, observou-se diferenças entre eles, onde o grupo 1 apresentou maiores médias para todas as variáveis analisadas nos dois agrupamentos propostos. O que pode ser justificável por ser a região menos afetada no ano de 2021, sendo assim ocorrido apenas uma geada na área estudada e pela recuperação das plantas ao decorrer do tempo, conforme Valente et al., (2024).

Conforme Souza et al.,(2006), em seus estudos plantas de idade inferior podem apresenta valores médios de altura próximo a 1.85m, o que pode ser variável conforme a planta cafeeira é manejada.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos agrupamentos 1 e 2 envolvendo plantas com 3 anos de idade utilizando parâmetros como diâmetro de copa, altura de planta, volume de planta e IAF de uma população de plantas cafeeiras.

	Grupo	Diâmetro de copa	Altura de planta	Volume de planta	IAF
Agrupamento 1	1	1.41	0.72	1.23	0.01533
	2	1.21	0.68	0.86	0.01070
Agrupamento 2	1	1.41	0.72	1.23	0.01533
	2	1.21	0.68	0.86	0.01071

Fonte: autora (2025)

Os autores Matiello et al. (2016) e Morais et al. (2009) afirmam que plantas afetadas pela geada podem apresentar dificuldades em seu desenvolvimento. Entre as condições climáticas adversas, a mais temida na cafeicultura é, sem dúvida, o fenômeno da geada, já que o cafeeiro está entre as culturas mais sensíveis aos seus efeitos. O frio, por si só, já atua como um fator de retardamento do crescimento das plantas. O estudo analisou dois conjuntos

experimentais, cada um composto por dois grupos de plantas. Em ambos os agrupamentos, foi observado um decréscimo no diâmetro da copa vegetal, padrão igualmente identificado para os parâmetros de altura e volume calculado das plantas. A consistência dessas métricas foi mantida entre os grupos, independentemente do agrupamento avaliado. Em relação à área foliar, os dados mostraram valores constantes para o (grupo 1) em todas as amostras, com estabilidade equivalente no (grupo 2). A homogeneidade observada nos subgrupos sugere a possível influência de variáveis ambientais comuns, que podem ter modulado uniformemente as características mensuradas ao longo das análises.

4.2.1. Análise de variância para agrupamento 1 e 2

Foi realizada a análise de variância para comparação das médias dos tratamentos para cada variável em estudo, considerando o nível de 5% de significância. A hipótese nula (H_0) a ser testada é de que as médias são iguais e a hipótese alternativa (H_1) é que ao menos uma média difere entre os tratamentos.

- **Diâmetro de copa**

Ao nível de 5% de significância, o Teste de Shapiro-Wilk rejeita a hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos (valor $p = 2,943746e^{-22}$) e o Teste de Bartlett rejeita a hipótese de homogeneidade das variâncias (valor $p = 0$), violando os pré-requisitos para a análise de variância. Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como os pressupostos da análise de variância não foram atendidos e não foi possível obter uma transformação nos dados, foi realizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, cuja H_0 é a afirmação de que as medianas são iguais. Como valor $p < 2,2e^{-16}$, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **Altura de planta**

Considerando a variável altura de planta, as suposições de normalidade dos resíduos e de homogeneidade das variâncias não foram atendidas (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 7,825826e^{-14}$ e Teste de Bartlett com valor- $p = 1.512406e^{-09}$). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p = 1,204e^{-13}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **Volume de planta**

Ao nível de 5% de significância, os pressupostos de normalidade e de homogeneidade das variâncias não foram atendidos (Teste de Shapiro-Wilk com valor- $p = 1,295197e^{-19}$ e Teste de Bartlett com valor- $p = 0$). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **IAF**

Ao nível de 5% de significância, os pressupostos dos testes de Shapiro-Wilk (valor- $p = 1,295197e^{-19}$) e de Bartlett (valor- $p = 0$) não foram atendidos. Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

Utilizando a análise de variância para comparação das médias das variáveis entre os grupos 1 e 2, ao nível de 5% de significância, observou-se que todas as variáveis estudadas não atenderam aos pressupostos de normalidade dos resíduos e/ou homogeneidade das variâncias. Assim, seguiu-se para a tentativa de transformação dos dados de Box-Cox, porém, sem sucesso, para todas as variáveis.

Para realizar a comparação entre os grupos 1 e 2, foi necessária a utilização de um método não paramétrico. Foi utilizado o teste de Mann-Whitney, o qual compara as medianas entre os grupos. Ao nível de 5% de significância, observou-se que todas as variáveis apresentaram medianas diferentes para os grupos 1 e 2, justificando assim a presença de diferença para todas as variáveis estudadas nas plantas do grupo 1 e 2 afetadas pela geada.

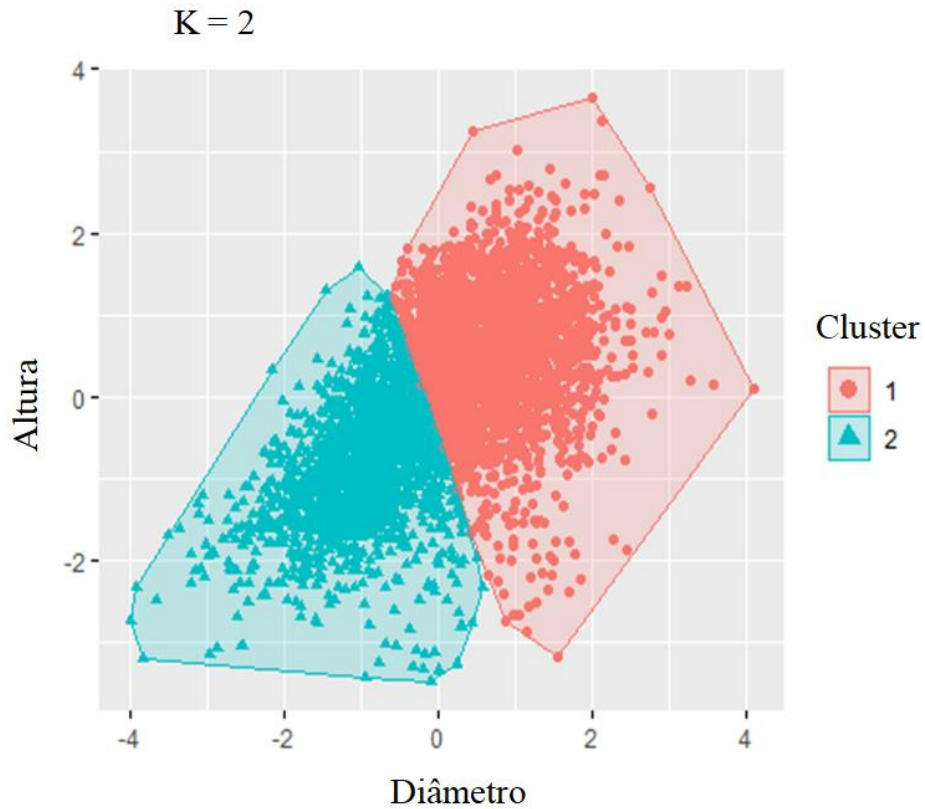
Assim pela análise observou-se que as variáveis estudadas nas áreas de plantas de 3 anos de idade, altura de planta, volume de planta e IAF apresentaram medianas diferentes para os grupos 1 e 2. As variáveis diâmetro de copa não apresentaram medianas diferentes entre os grupos 1 e 2.

Análise de agrupamento 1

Como citado anteriormente, considerou-se o número de agrupamentos igual a 2 e houve uma divisão bem clara entre os grupos, (grupos 1) em vermelho e (grupo 2) em azul, a extração das informações altura de planta e diâmetro de copa possibilitou identificar na área 2

características importantes para separação clara das plantas cafeeiras, como observado na Figura 12, corroborando com os dados obtidos na Figura 13 onde é possível verificar que o (grupo 1) está mais concentrado no quadrante direito e o grupo 2, no quadrante esquerdo.

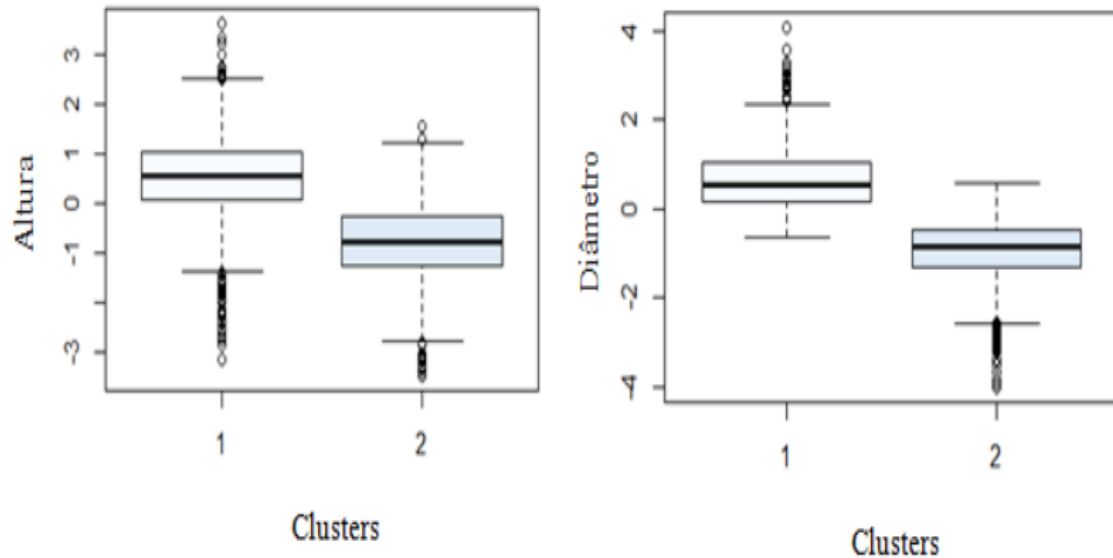
Figura 13 - Gráfico de dispersão com a clusterização realizada.



Fonte: autora (2025)

O grupo 1 é formado por 2307 observações, e, o grupo 2, por 2385. Na Figura 14, observa-se que o grupo 1 tem valores mais altos tanto para o diâmetro de copa, quanto para a altura de planta.

Figura 14 - Gráfico boxplot da variável diâmetro de copa, altura de plantanos clusters.



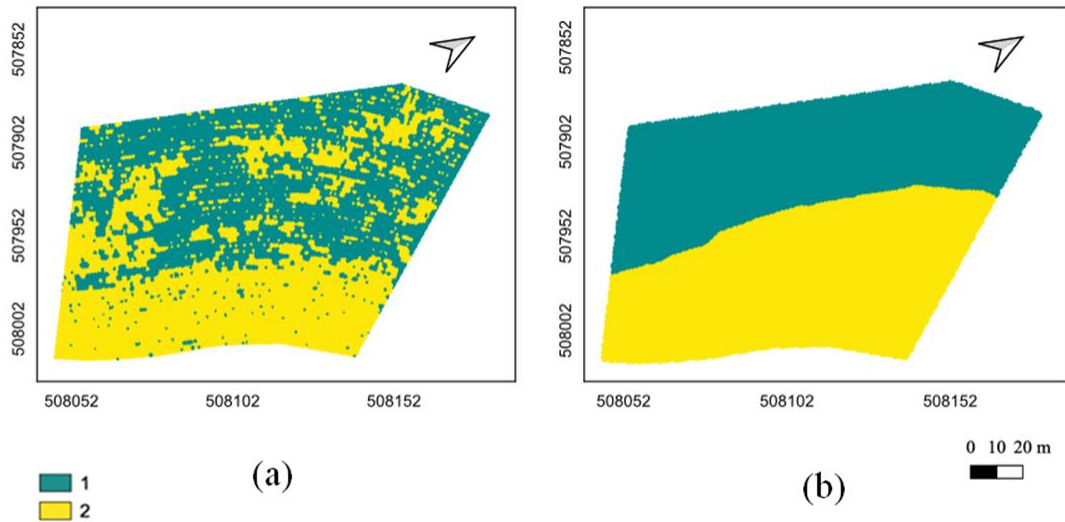
Fonte: autora (2025)

Zoneamento agrupamento 1

As análises resultaram em um zoneamento, a partir do qual foi necessário após os resultados de uma análise de variância (ANOVA). Por meio da análise de variância (ANOVA) com as duas variáveis em estudo, explicando a variável cluster. O objetivo, neste caso, é testar se há diferença estatística entre os agrupamentos 1 e 2. O valor $p < 2,2e^{-16}$ mostra haver indícios para se rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos 1 e 2, ao nível de 5% de significância. Então os grupos se demonstram ser diferentes estatisticamente, podendo, assim, sugerir um mapeamento.

A partir da análise dos mapas dos grupos, gerados pelo agrupamento não hierárquico das plantas cafeeiras da área 2, com 3 anos de idade a campo (Figura 15), observou-se que as características de altura de planta e diâmetro da população, apresentaram-se de forma mais heterogênea, em comparação à classificação proposta por Marin et al (2021).

Figura 15 - Mapas desenvolvidos pela metodologia deste trabalho segundo altura de planta e diâmetro de copa (a) e Mapa desenvolvido baseado na metodologia proposta por Valente et al (2024) e Marin et al.(2021).



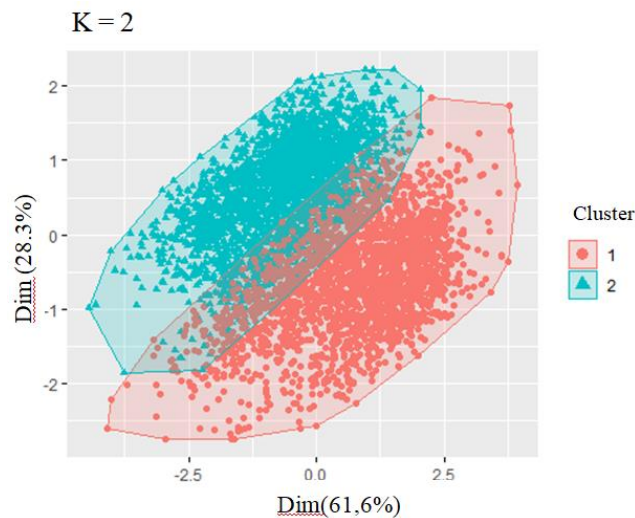
Fonte: autora (2025)

Observou-se que a classificação proposta no presente estudo, baseada em dados obtidos pelo sensor LiDAR, possibilitou a identificação de diferentes regiões de plantas nos (grupos 1) e (grupo 2), com maior e menor incidência de geada, dentro das áreas investigadas. Verificou-se que a divisão não foi tão clara quanto à metodologia proposta por Marin et al. (2021), pois, ao considerar as plantas como indivíduos únicos e agrupá-las com base em sua altura e diâmetro de copa, foram identificadas zonas espalhadas pela área. Esse padrão revela que o efeito da geada pode afetar uma região de maneiras diferentes e em locais distintos. Essa constatação favorece a adoção de novas estratégias de recuperação e manejo, visto que nem todas as plantas da área foram igualmente afetadas, o que permite otimizar a produção agrícola e maximizar o lucro, reduzindo as possíveis perdas na cultura. As análises possibilitaram a identificação de regiões para a entrada de um manejo mais preciso e melhor geolocalizado, visto que as informações foram obtidas por um sensor LiDAR e uma base RTK, onde foram levado em consideração a distribuição de informações de altura e diâmetro de copa. Informações essas que possibilitam ao produtor a preservação da sua cultura agrícola. A partir dessas informações o produtor poderá planejar e realizar um manejo mais consciente, realizando operações de recuperação, entre elas adubação, pulverização em áreas e plantas com maior exatidão. Sendo assim, as regiões às quais deve se iniciar o planejamento de recuperação seriam as zonas em verde.

Análise do agrupamento 2

Os dados originais considerados no estudo incluíram três variáveis: altura de planta, diâmetro de copa e altimetria. O conjunto de dados contém 4.692 observações na população. Na Figura 16, pode-se observar que o Grupo 1 está mais concentrado no canto inferior, enquanto o grupo 2 se encontra no canto superior, evidenciando a separação entre os grupos com base nas variáveis analisadas. Na Figura 16, observa-se que o mesmo método foi aplicado para separar os grupos de plantas cafeeiras de 3 anos de idade, mas agora com a utilização da variável altimetria no agrupamento 2, como terceira variável. O novo espaço multidimensional gerado fez com que a separação dos clusters mudasse, mas mantendo-se a estrutura principal de divisão. A adição da variável altimetria apresenta um maior refinamento nos dados dos grupos, pois as regiões convexas estão mais bem definidas. Apesar disso a sobreposição dos clusters sugere uma relação complexa não explicada. Assim a adição da altimetria não mostrou ser um fator determinante, mas que reduziu a variabilidade interna dos grupos propostos na clusterização.

Figura 16 - Gráfico de dispersão com a clusterização realizada.

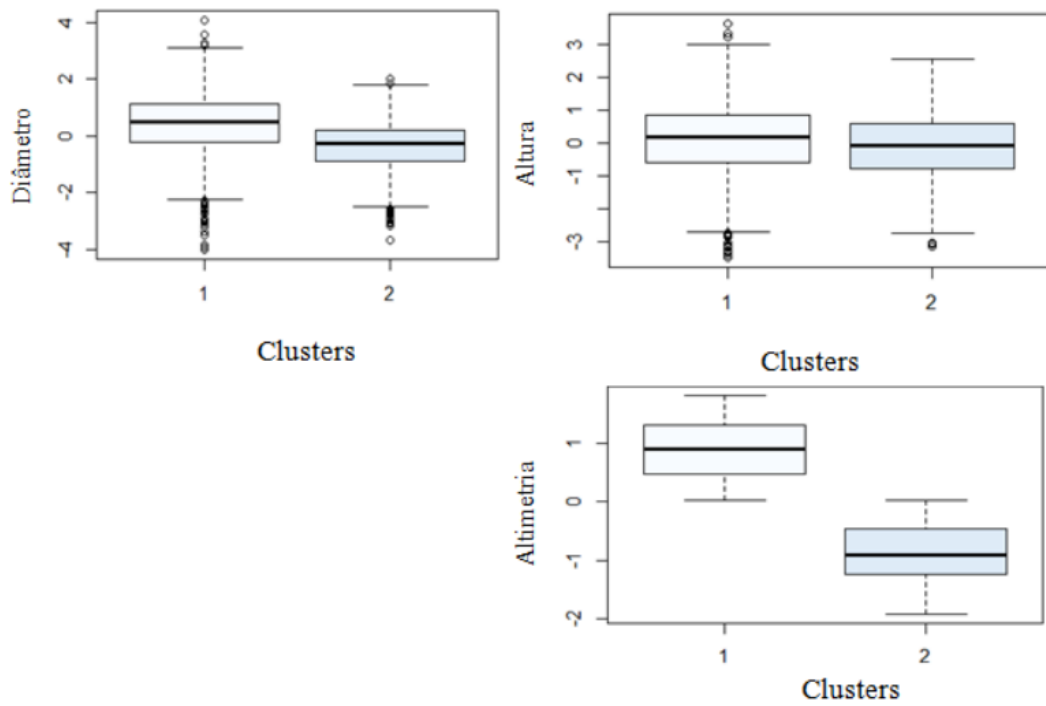


Fonte: autora (2025)

O grupo 1 é composto por 2307 observações, e, o grupo 2, por 2385. Para a realização da análise de variância para a comparação de médias, considerou-se uma margem de erro de 5% e 95% de confiança.

Como observado nas Figuras 17, o grupo 1 obteve valores maiores para o diâmetro de copa, a altura de planta e a altimetria, respectivamente, quando comparado ao grupo 2.

Figura 17 - Gráfico boxplot da variável altura, diâmetro de copa e altimetria nos clusters.

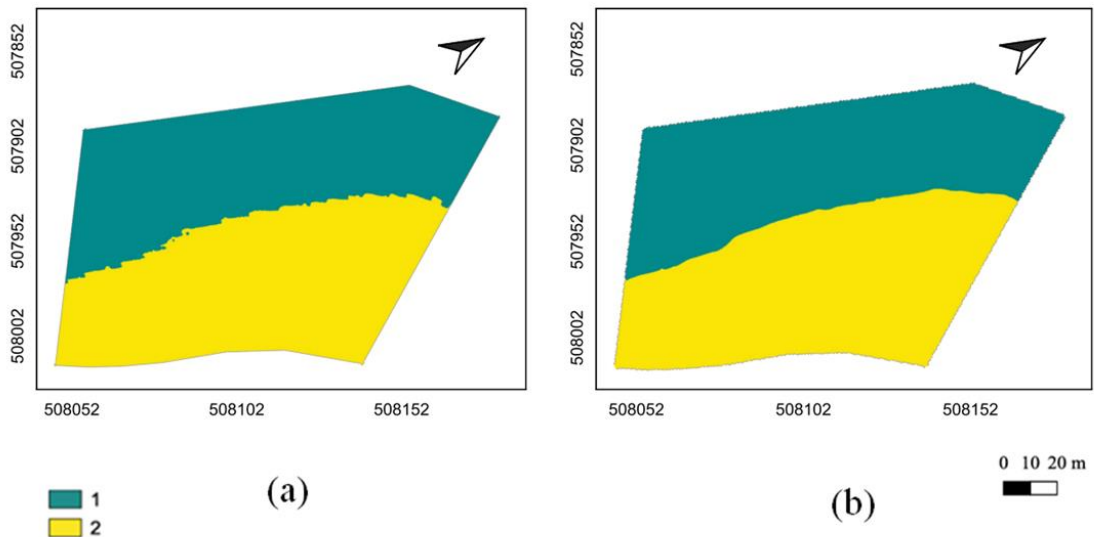


Fonte: autora (2025)

Zoneamento do agrupamento 2

Como já apresentado para o (agrupamento 2) realizou-se, em seguida, uma análise de variância (ANOVA) com as duas variáveis em estudo, explicando os (grupos 1) e (grupo 2) . O objetivo, neste caso, é testar se há diferença estatística entre os agrupamentos 1 e 2. O valor $p < 2,2e^{-16}$ mostra haver indícios para se rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos, ao nível de 5% de significância. Então os grupos se demonstram diferentes estatisticamente, podendo, assim, sugerir mapeamento para esses grupos.

Figura 18 - Mapas desenvolvido pela metodologia deste trabalho segundo altura de planta, diâmetro de copa e altimetria (a) e Mapa desenvolvido baseado na metodologia proposta por Marin et al., (2021)



Fonte: autora (2025)

A partir da análise dos mapas dos grupos gerados pelo agrupamento não hierárquico das plantas cafeeiras a campo (Figura 18), observou-se que as características de altura de planta e diâmetro da população, apresentou-se de forma mais homogênea, comparado com a classificação proposta por Marin et al. (2021). Na classificação proposta por este trabalho, observa-se uma diferença no limite que separa os Grupos 1 e 2, suavizando as fronteiras, mas ainda seguindo um padrão aproximado da classificação proposta por Marin et al. (2021). Essa abordagem reforça a metodologia do referido autor, mantendo a lógica de divisão entre os grupos, ao mesmo tempo em que aprimora a definição das regiões, proporcionando uma análise mais precisa das áreas afetadas pela geada. As regiões ao norte em verde, foram mais afetadas pela incidência da geada, e as regiões ao sul em amarelo, foram menos afetadas.

4.3. Área 3

Os dados considerados no estudo da Área 3 compreendem 4.586 observações. As amostras foram distribuídas igualmente entre os grupos, considerando a margem de erro de 5% e 95% de confiança. Como observado na Tabela 4, para o (Agrupamento 1) as observações do diâmetro da copa apresentaram valores médios de 2,42 metros para o Grupo 1

e de 1,86 metros para o Grupo 2. Para a variável altura de planta, os valores médios foram de 0,96 metros no (grupo 1) e 0,81 metros no (grupo 2). Quanto ao volume de planta, o (grupo 1) apresentou média de 4,46 m³, enquanto o (grupo 2) teve média de 2,27 m³. Por fim, para o índice de área foliar, os valores médios observados foram de 0,055 no (grupo 1) e 0,028 no (grupo 2).

Tabela 4 - Estatística descritiva dos agrupamentos 1 e 2 da área 3 sendo as variáveis analisadas: diâmetro de copa, altura de planta, volume de planta e IAF de uma população de plantas cafeeiras agrupadas em grupo 1 e 2.

	Grupo	Diâmetro de copa	Altura de planta	Volume de planta	IAF
Agrupamento	1	2,42	0,96	4,46	0,055
1	2	1,86	0,81	2,27	0,028
Agrupamento	1	2,23	0,90	3,74	0,046
2	2	1,99	0,84	2,74	0,034

Fonte: autora (2025)

Para o (Agrupamento 2) proposto, as observações do diâmetro da copa das plantas cafeeiras apresentaram valores médios de 2,23 metros para o (grupo 1) e de 1,99 metros para o (grupo 2). Para a variável altura de planta, os valores também diferiram entre os grupos. Quanto ao volume de planta, os valores médios foram de 3,74 m³ para o (grupo 1) e de 2,74 m³ para o (grupo 2). Em relação ao índice de área foliar (IAF), o valor médio observado foi de 0,046 para o (grupo 1) e de 0,034 para o (grupo 2).

Observa-se para todas as variáveis, foram maiores no (grupo 1) como observado na Tabela.4, alguns estudos sugerem que as plantas cafeeiras nas geadas periódicas, as plantas podem se "preparar" para sua ocorrência anual por meio de um processo gradual de aclimação dos seus mecanismos fisiológicos (SAKAI & LARCHER, 1987). Estes autores ainda afirmam que esse fenômeno favorece a adaptação das plantas às condições adversas, permitindo uma recuperação mais eficiente após a exposição ao estresse térmico causado pela geada. Conforme Chica (2013) plantas mais jovens possuem a capacidade de recuperação a fatores climáticos, sendo assim melhor em realizar um processo enzimático eficiente para se recuperar.

Para ambos os agrupamentos em estudo, podem-se observar valores diferentes para

todas as variáveis analisadas. A partir da análise dos valores médios das variáveis estudadas das plantas cafeeiras, foi possível verificar que existe pouca variação nos dados, porém somente o conhecimento desta amplitude não é suficiente para saber quais são os locais onde se encontram os extremos, maiores e menores valores. Desta forma, é necessário utilizar outras alternativas como o agrupamento não hierárquico.

4.3.1. Análise de variância para o agrupamento 1

Foi realizada a análise de variância para comparação das médias dos tratamentos para cada variável em estudo, considerando o nível de 5% de significância. A hipótese nula (H_0) a ser testada é de que as médias são iguais e a hipótese alternativa (H_1) é que ao menos uma média difere entre os tratamentos.

- **Diâmetro de copa**

Ao nível de 5% de significância, o Teste de Shapiro-Wilk rejeita a hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos (valor $p = 1,396629e^{-50}$) e o Teste de Bartlett rejeita a hipótese de homogeneidade das variâncias (valor $p = 0$), violando os pré-requisitos. Seguiu-se, portanto, com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como os pressupostos da análise de variância não foram atendidos e não foi possível obter uma transformação nos dados, foi realizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, cuja H_0 é a afirmação de que as medianas são iguais. Como valor $p < 2,2e^{-16}$, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos grupos 1 e 2 são diferentes.

- **Altura de planta**

Considerando a variável altura de planta, a suposição de normalidade dos resíduos não foi atendida (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 0,0281906$). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2

- **Volume de planta**

Ao nível de 5% de significância, os pressupostos de normalidade (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 7,424034e^{-26}$) e de homogeneidade das variâncias (Teste de Bartlett com valor $p = 0$) não foram atendidos. Seguiu-se, portanto, com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Com valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste

de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos volumes de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **IAF**

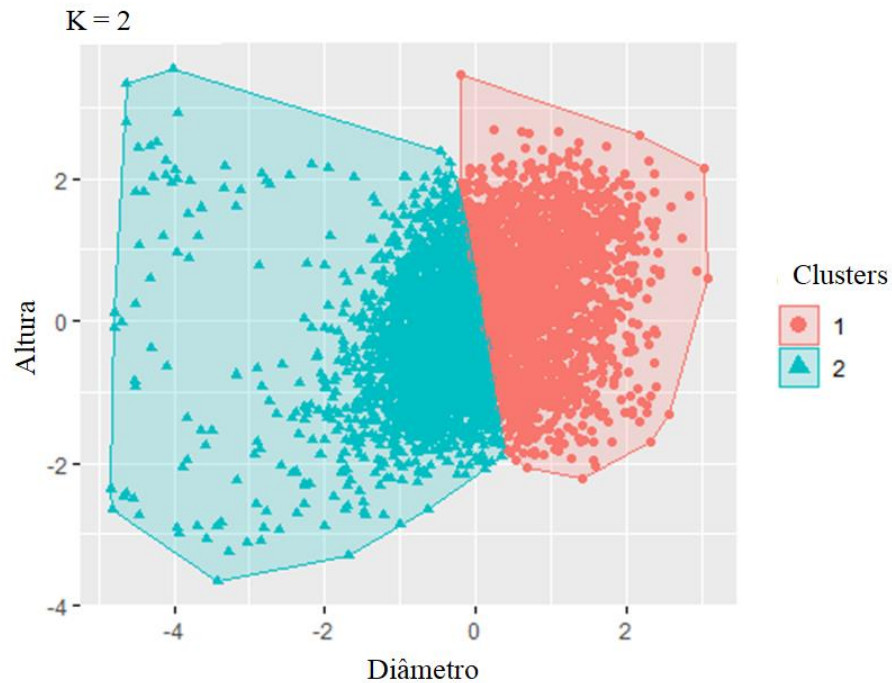
Ao nível de 5% de significância, os pressupostos dos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett não foram atendidos, apresentando os valores-p iguais a $7,424034e^{-26}$ e a 0, respectivamente. Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Com o valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos IAF de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

Utilizando a análise de variância para comparação das médias das variáveis entre os grupos 1 e 2, considerando a área 3, ao nível de 5% de significância, observou-se que, todas as variáveis estudadas não atenderam aos pressupostos de normalidade dos resíduos e/ou homogeneidade das variâncias. Assim, seguiu-se para a tentativa de transformação dos dados de Box-Cox, porém, sem sucesso, para todas as variáveis. Assim, para realizar a comparação entre os grupos 1 e 2, foi necessária a utilização de um método não paramétrico. Foi utilizado o teste de Mann-Whitney, o qual compara as medianas entre os grupos. Ao nível de 5% de significância, observou-se que todas as variáveis apresentaram medianas diferentes, apresentando assim diferença dos dois grupos de plantas analisados.

Análise do agrupamento 1

Pela análise da Figura 19, observa-se que houve uma divisão bem clara entre os grupos, sendo que o grupo 1 tem sua concentração no canto direito e, o grupo 2, no canto esquerdo. O grupo 1 é formado por 2027 observações, e, o grupo 2, por 2560. Nesse agrupamento pode-se observar que o grupo 1 apresentou uma parcela menor de indivíduos que o grupo 2.

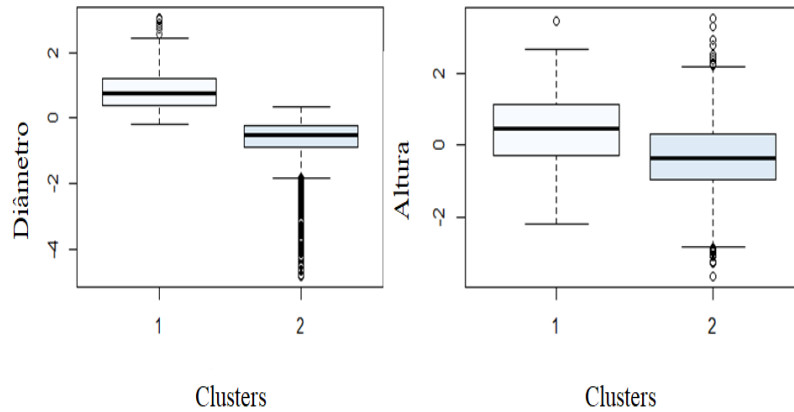
Figura 19 - Gráfico de dispersão com a clusterização realizada.



Fonte: autora (2025)

Observa-se que, tanto a altura de planta quanto o diâmetro de copa, foram maiores no (grupo 1) como observado na (Figura 20). Alguns estudos sugerem que, em contraste, nas geadas periódicas, as plantas podem se "preparar" para sua ocorrência anual por meio de um processo gradual de aclimação dos seus mecanismos fisiológicos (SAKAI & LARCHER, 1987). Estes autores ainda afirmam que esse fenômeno favorece a adaptação das plantas às condições adversas, permitindo uma recuperação mais eficiente após a exposição ao estresse térmico causado pela geada.

Figura 20 - Gráfico boxplot da variável diâmetro de copa, altura de planta e altimetria nos clusters.



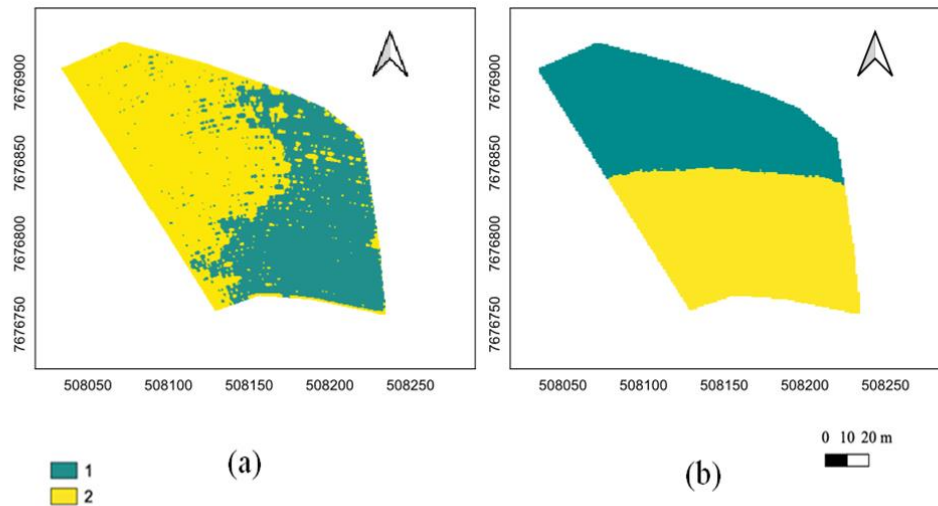
Fonte: autora (2025)

Zoneamento agrupamento 1

Como base na análise de variância (ANOVA) com as duas variáveis em estudo, explicando os grupos 1 e 2. O objetivo, neste caso, é verificar se há diferença estatística entre os grupos 1 e 2. O valor $p < 2,2e^{-16}$ mostra haver indícios para se rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos, ao nível de 5% de significância. Então os grupos se demonstram diferentes estatisticamente, podendo, assim, sugerir um perfil para esses clusters.

A partir da análise dos mapas dos grupos gerados pelo agrupamento não hierárquico das plantas cafeeiras de 4 anos de idade a campo (Figura 21a), observou-se que as características de altura de planta e diâmetro de copa da população, apresentaram-se de forma mais heterogênea, comparado com a classificação proposta por Marin et al. (2021).

Figura 21- Mapas desenvolvidos pela metodologia deste trabalho segundo altura de planta e diâmetro de copa (a) e Mapa desenvolvido baseado na metodologia proposta por Marin et al.,(2021) (b).



Fonte: autora (2025)

Pela metodologia proposta neste trabalho, pode-se observar na (Figura 21) existe uma diferença no local que limita o grupo 1 e 2, havendo uma rotação desta divisão. As análises possibilitaram a identificação de regiões para a entrada de um manejo mais preciso e melhor geolocalizado, visto que as informações foram obtidas por um sensor LiDAR e uma base RTK, onde foram levado em consideração a distribuição de informações de altura de planta e diâmetro de copa. Informações essas que possibilitam ao produtor a tomar melhores decisões. Baseadas em análises estatísticas e características das plantas. A partir dessas informações o produtor poderá planejar e realizar um manejo mais consciente, realizando operações de recuperação da saúde das plantas, entre elas adubação, pulverização em áreas e plantas com maior exatidão, assim deslocando recursos e mão de obra para áreas que realmente exige atenção ao contrário da proposta por Marin et al (2021) que uniformiza a área afetada pela geada.

4.3.2. Análise de Variância para agrupamento 2

Para cada variável foi realizada a análise de variância para comparação das médias dos tratamentos para cada variável em estudo, considerando o nível de 5% de significância. A

hipótese nula (H_0) a ser testada é de que as médias são iguais e a hipótese alternativa (H_1) é que ao menos uma média difere entre os tratamentos.

- **Diâmetro de copa**

Ao nível de 5% de significância, o Teste de Shapiro-Wilk rejeita a hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos (valor $p = 6,861472e^{-42}$) e o Teste de Bartlett rejeita a hipótese de homogeneidade das variâncias (valor $p = 0$), violando os pré-requisitos para a análise de variância. Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Como os pressupostos da análise de variância não foram atendidos e não foi possível obter uma transformação nos dados, foi realizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney, cujo H_0 é a afirmação de que as medianas são iguais. Com valor $p < 2,2e^{-16}$, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **Altura de planta**

Considerando a variável altura de planta, as suposições de normalidade dos resíduos e de homogeneidade das variâncias não foram atendidas (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 7,057093e^{-9}$ e Teste de Bartlett com valor $p = 4,540812e^{-14}$). Desta maneira, seguiu-se com a transformação dos dados, utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Com valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, portanto, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **Volume de planta**

Ao nível de 5% de significância, os pressupostos de normalidade e de homogeneidade das variâncias não foram atendidos (Teste de Shapiro-Wilk com valor $p = 5,974339e^{-23}$ e Teste de Bartlett com valor $p = 0$). Assim sendo, seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso. Com o valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

- **IAF**

Ao nível de 5% de significância, os pressupostos dos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett não foram atendidos (valor $p = 5,974339e^{-23}$ e $p = 0$, respectivamente). Seguiu-se com a transformação dos dados utilizando a transformação de Box Cox, porém, sem sucesso.

Com valor $p < 2,2e^{-16}$ no teste de Mann-Whitney, rejeita-se a H_0 . Logo, ao nível de 5% de significância, as medianas dos diâmetros de copa diferem entre os grupos 1 e 2.

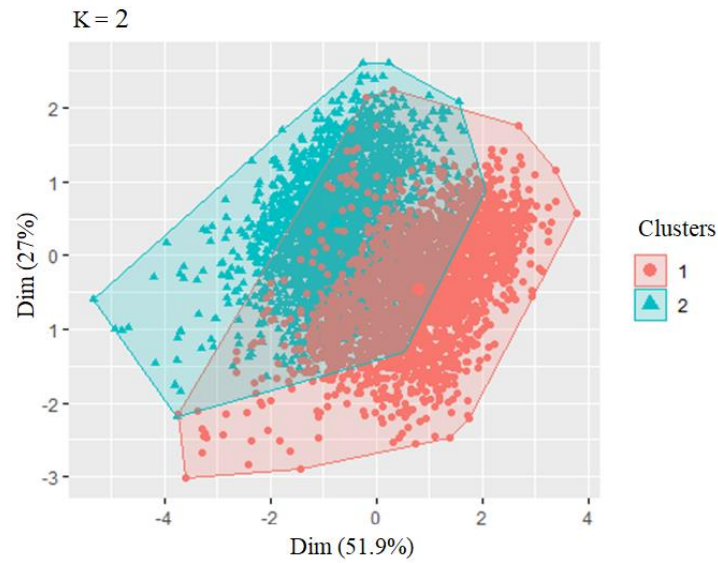
Utilizando a análise de variância para comparação das médias das variáveis entre os grupos 1 e 2, ao nível de 5% de significância, observou-se que todas as variáveis estudadas não atenderam aos pressupostos de normalidade dos resíduos e/ou homogeneidade das variâncias. Assim, seguiu-se para a tentativa de transformação dos dados de Box-Cox, porém, sem sucesso, para todas as variáveis. Para realizar a comparação entre os grupos 1 e 2, foi necessária a utilização de um método não paramétrico. Foi utilizado o teste de Mann-Whitney, o qual compara as medianas entre os grupos. Ao nível de 5% de significância, observou-se que todas as variáveis (altura de planta, diâmetro de copa, volume de planta e IAF apresentaram medianas diferentes para os grupos 1 e 2. Sendo assim, para as plantas cafeeiras da área 3 em estudo, observou-se que todas as variáveis analisadas apresentaram diferenças entre grupos 1 e 2 após a ocorrência da geada.

Agrupamento 2

Os dados considerados no estudo, então, continham 4586 observações, observações igualmente distribuídas nos grupos 1 e 2. A divisão não foi muito clara entre os grupos, como observado na Figura 22.

Na Figura 22, observa-se que o mesmo método foi aplicado para separar os grupos, mas agora com a utilização da variável altimetria no agrupamento 2, para plantas de 4 anos de idade. O novo espaço multidimensional gerado fez com que a separação dos clusters mudasse, mas mantendo-se a estrutura principal de divisão. A adição da variável altimetria apresenta um maior refinamento nos dados dos grupos, pois as regiões convexas estão mais bem definidas. Apesar disso, a sobreposição dos clusters sugere uma relação complexa não explicada. Assim a adição da altimetria não mostrou ser um fator determinante, mas que reduziu a variabilidade interna dos grupos propostos.

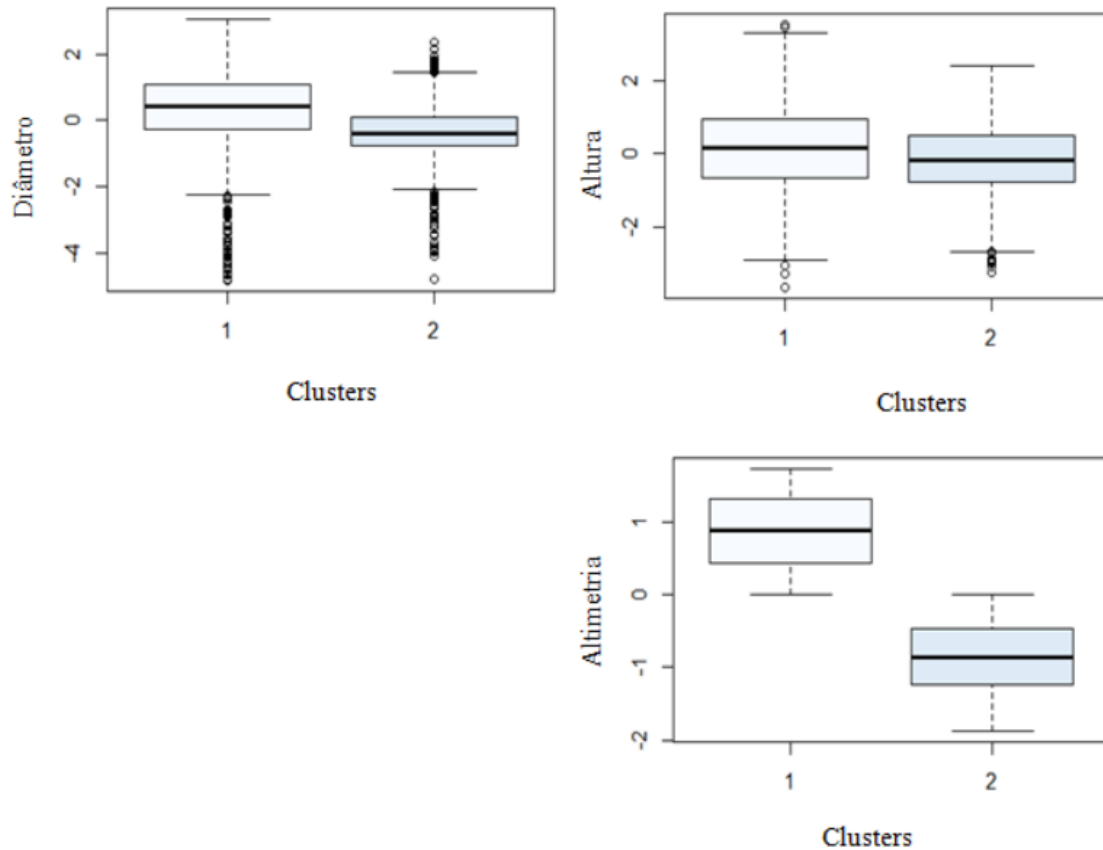
Figura 22 - Gráfico de dispersão com a clusterização realizada.



Fonte: autora (2025)

O grupo 1 é composto por 2280 observações, e, o grupo 2, por 2307. Como observado na Figura 23, o grupo 1 obteve valores maiores para o diâmetro de copa, a altura de planta e a altimetria, quando comparado ao grupo 2. Nessa metodologia de agrupamento pode se observar que o grupo 2, obteve se mais indivíduos que o grupo 1.

Figura 23 -Gráfico boxplot da variável diâmetro de copa, altura de planta e altimetrianos clusters

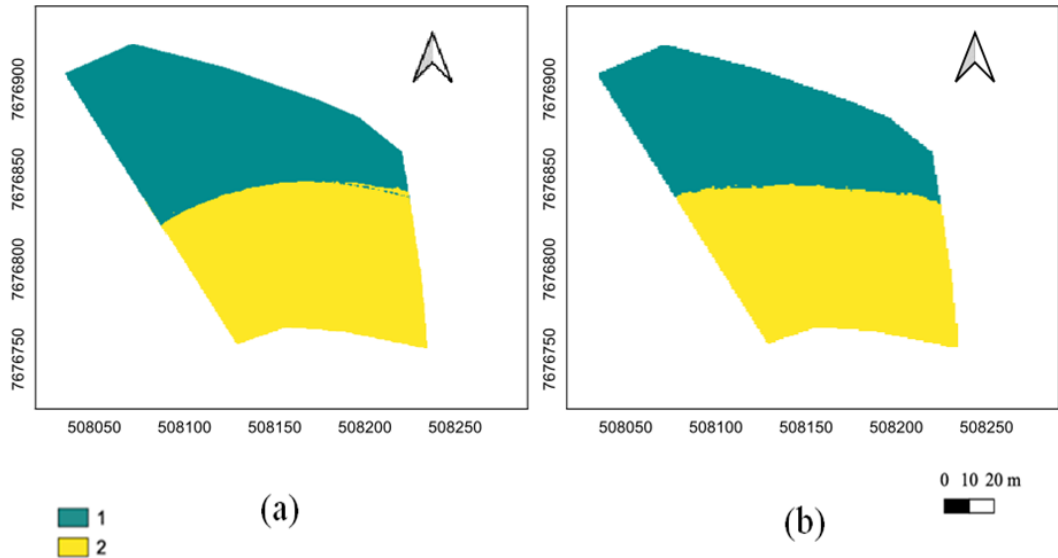


Fonte: autora (2025)

Zoneamento agrupamento 2

Com a análise de variância (ANOVA) com as duas variáveis em estudo, explicando o mapeamento dos grupos, assim obtive se a diferença estatística entre os grupos 1 e 2 . O valor $p < 2,2e^{-16}$ validando a presença de diferença entre os grupos 1 e 2, assim, rejeita se a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos, ao nível de 5% de significância. Assim, os grupos demonstram ser estatisticamente diferente, o que possibilita a definição de um mapa para esses grupos, considerando as variáveis analisadas. Essa distinção pode auxiliar na compreensão das características específicas de cada grupo, contribuindo para estratégias de manejo mais direcionadas e eficientes.

Figura 24 - Mapas desenvolvidos pela metodologia deste trabalho segundo altura de planta e diâmetro de copa e altimetria (a) e Mapa desenvolvido baseado na metodologia proposta por Marin et al., (2021)



Fonte: autora (2025)

Para as plantas cafeeiras de quatro anos, a partir da análise dos mapas dos grupos gerados pelo agrupamento não hierárquico das plantas a campo (Figura 23), observou-se que as características de altura de planta e diâmetro da copa apresentaram-se de forma mais semelhante comparação com a classificação proposta por Marin et al. (2021). A metodologia proposta por este trabalho promoveu uma classificação que demonstrou a existência de uma diferença no local que limita o grupo 1 e 2, suavizando esta linha limítrofe, mas seguindo um padrão aproximado com relação a metodologia proposta por Marin et al (2021).

Assim a metodologia possibilita uma coleta mais eficaz reduzindo a necessidade de várias visitas ao campo como realizado atualmente pelo produtor agrícola.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu desenvolver e testar uma metodologia inovadora de mapeamento de zonas de ocorrência de geadas, utilizando dados obtidos por sensores LiDAR embarcados em RPAs. Essa metodologia baseou-se em técnicas de agrupamento de dados, sendo capaz de identificar e classificar, de forma eficiente, áreas com diferentes níveis de impacto da geada, atendendo ao primeiro objetivo da pesquisa.

Os resultados demonstraram que os grupos de plantas cafeeiras afetadas pela geada apresentaram diferenças estatisticamente significativas nas variáveis analisadas: altura da planta, diâmetro da copa, volume da planta e Índice de Área Foliar (IAF). Esses dados evidenciam o potencial da abordagem proposta para detectar alterações morfológicas associadas ao estresse térmico causado pela geada.

Por fim, ao utilizar os dados gerados por sensores LiDAR embarcados em RPAs no processo de agrupamento, comprovou-se a aplicabilidade dessa tecnologia no monitoramento pós-geada, permitindo análises rápidas, em larga escala e com alto nível de detalhamento. A metodologia desenvolvida demonstrou-se superior às abordagens encontradas na literatura, representando um avanço significativo para a cafeicultura de precisão e digital e contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação e manejo dos impactos climáticos sobre a lavoura cafeeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU et al. Uso do sensor LiDAR em análises de altura de plantas cafeeiras. In: CONGRESSO REGIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO UFLA, 32, Lavras. Anais, 2023. p. 1222-1257.
- ALMEIDA, K. M. et al. Efeito de diferentes proporções de moinha de café na composição de substratos alternativos para produção de mudas de pepino. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 515-522, 2018.
- ALVES, et al. Danos na cultura do café causado pelas geadas ocorridas no ano de 2021 nos municípios de Alfenas e Poços de Caldas, Brasil. **Peer Review**, 6(9), p 1–15. Recuperado de. 2024.
- ALLEVATO, Emilia et al. Canopy damage by spring frost in European beech along the Apennines: effect of latitude, altitude and aspect. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 431-440, 2019.
- BARATA, et al, Índices de vegetação baseados em UAV para avaliar a resposta da colheita de café após o transplante de mudas cultivadas em diferentes recipientes. **Agricultura**, 2024.
- BARATA, Rafael Alexandre Pena et al. UAV-Based Vegetation Indices to Evaluate Coffee Crop Response after Transplanting Seedlings Grown in Different Containers. **Agriculture**, v. 14, n. 3, p. 356, 2024.
- BARBOSA, B. D. S. et al. RGB vegetation indices applied to grass monitoring: A qualitative analysis, v. 11, p. 315, 2019
- BARBOSA, Brenon et al. Application of RGB Images Obtained by UAV in Coffee Farming. **Remote Sensing**, v. 13, p. 2397, 2021.
- BARBOSA, João Paulo Rodrigues Alves Delfino et al. Estimativa do IAF de cafeeiro a partir do volume de folhas e arquitetura da planta. 2012.
- BARROS, R. S. et al. Determinação de área de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 20, p. 44-52, 1973.
- BENTO, Nicole et al. Estimate and Temporal Monitoring of Height and Diameter of the Canopy of Recently Transplanted Coffee by a Remotely Piloted Aircraft System. **AgriEngineering**, v. 4, p. 207-215, 2022.
- BENTO, Nicole et al. Soil compaction mapping by plant height and spectral responses of coffee in multispectral images obtained by remotely piloted aircraft system. **PRECISION AGRICULTURE**, p. 1-22, 2023.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, Edinburgh, Vol. 26, Issue 2, pp. 211–252, 1964.
- BRAINER, Maria et al. Produção e mercado do café. 2021.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**. (2023). Ações do MAPA para o desenvolvimento da agricultura familiar. Disponível em [Sumario_Cafe_maio_2023.pdf (consorcioesquisacafe.com.br)]. Acesso em: 8 de maio de 2023.

BROWN, C. et al, Tropical Peatland Vegetation Structure and Biomass: Optimal Exploitation of Airborne Laser Scanning. **Remote Sens.** 2018, 10, 671. <https://doi.org/10.3390/rs10050671>.

CAMARGO, MBP; SANTOS, MA; PEDRO JR., MJ; FAHL. Modelo agrometeorológico para monitoramento e predição da produtividade do café (*Coffea arabica L.*) no estado de São Paulo, Brasil. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COFFEE SCIENCE*, 21^{de} setembro de 2006. Montpellier, França. Anais. ASIC: Montpellier: 2006. p.1125-1131. <https://www.scielo.br/j/brag/a/XYKdCC5mVKwx3F5P3m6VrzM/>

CANATA. Sistema de mensuração baseado em tecnologia LiDAR para a estimativa de parâmetros de produção de cana-de-açúcar. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CARVALHO et al. Proposta de classificação dos coeficientes de variação em relação à produtividade e altura da planta de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 187-193, 2003.

CARVALHO, C. H. M. de et al. Evolução do crescimento do cafeeiro (*Coffea arabica L.*) irrigado e não irrigado em duas intensidades de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 243-250, 2006.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. Inferência estatística-tradução da 2a edição norte americana. São Paulo: **Centage Learning**, 2014.

CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3645-3652.

CESAR, Julio; LUÍS, Edson; SP, Cândido Mota; MEIO, P. O. R.; VEGETAÇÃO, D. E. Índices D. E. Análise dos efeitos de geadas na cobertura vegetal do município de Cândido Mota-SP, Brasil, por meio de Índices de Vegetação. [S. l.], 2015.

CHIES, Cláudia; YOKOO, Sandra. Colonização do norte paranaense: avanço da cafeicultura e problemas decorrentes deste processo. **Revista GEOMAE**, v. 3, n. 1, p. 27-44, 2012.

COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de laser scanner aerotransportado em área de floresta usando o software livre GRASS. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3653-3660.

COLAÇO. Sensor LiDAR (Light Detection and Ranging) para obtenção de modelos tridimensionais de culturas de porte arbóreo. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE*

AGROINFORMATICA, 10., 2015, São Paulo. Anais São Paulo: Associação Brasileira de agroinformatica, 2015. p. 150-162.

CONAB. **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**. Acompanhamento de safra brasileiro, boletim 22/23. Disponível em : <http://www.conab.gov.br> Acesso em 06 de outubro de 2023.

CORRAR, J. L.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. Análise Multivariada: para cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia. **FIPECAFI**, 1ª ed. – 5ª re-impr. – São Paulo: Atlas, 2014.

COSTA, J. de O. et al. Índice de área foliar e coeficiente de extinção por radiação de uma copa de café sob níveis variáveis de irrigação por gotejamento. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 41, e42703, 2019.

CUNHA, G. R. Meteorologia: fatos e mitos. Passo Fundo: **EMBRAPA**, 1997.

CUNHA, Jorge Eduardo Ferreira. [ID 40] DANO POR GEADA NO CAFÉ E SUA RELAÇÃO COM VERTENTES EM PATROCÍNIO, MINAS GERAIS: Jorge Eduardo Ferreira Cunha. Revista Vitae-Educação, Saúde e Meio Ambiente UNICERP, v. 1, n. 9, p.37, 2021.

DE PÓSGRADUAÇÃO, EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA. EFEITO DE IRRADIÂNCIAS CONTRASTANTES NAS CARACTERÍSTICAS FOTOSSINTÉTICAS E NA ATIVIDADE DE ENZIMAS ANTIOXIDANTES EM PLANTAS JOVENS DE CHICHÁ. 2013.

DAMATTA, FM; RAMALHO, JDC Impactos da seca e do estresse térmico na fisiologia e produção do café: uma revisão. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p. 55-81, 2006.

DE SÁ FARIAS. et al. Dimensão espacial e determinantes da mão de obra familiar nos municípios de Minas Gerais em 2017. **O BRASIL RURAL**, p. 131, 2024.

DE SOUZA, Cristiano Márcio Alves et al. COMPARAÇÃO ENTRE DERRIÇA MANUAL E MECÂNICA DE FRUTOS E CAFEIEIRO/COMPARISON AMONG MANUAL AND MECHANICAL DETACHMENT OF COFFEE FRUIT. **Ceres**, v. 53, n. 305, 2006.

DOS SANTOS, S et al, Uso de imagens obtidas por aeronaves remotamente pilotadas e floresta aleatória para detecção de minador de folhas (*Leucoptera coffeella*) em cafeeiros recém-plantados. **Sensor Remoto** 2024, 16, 728. <https://doi.org/10.3390/rs16040728>.

DOS SANTOS, S. A. et al. Supervised classification and NDVI calculation from remote piloted aircraft images for coffee plantations applications. **Coffee Science-ISSN 1984-3909**, v. 16, p. 161978-e161978, 2021.

EMBRAPA. (2021). Produção de café por região do Brasil, safra 2020/2021. Disponível em: [<https://www.embrapa.br/>]. Acesso em: 13 de maio de 2022.

EMBRAPA. (2023). Produção de café por região do Brasil, safra 2022/2023. Disponível em: [https://www.embrapa.br/]. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

EMBRAPA. (2024). Produção de café por região do Brasil, safra 2023/2024. Disponível em: [https://www.embrapa.br/]. Acesso em: 13 de maio de 2024.

EVANGELISTA, Adão WP; CARVALHO, Luiz G. de; SEDIYAMA, Gilberto C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 445-452, 2002.

EZENNE, G. I. et al. Current and potential capabilities of uas for Cropwater productivity in precision agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 158-164, 2019.

FARIA, R. de O. Malha amostral para cafeicultura de precisão. 2019.p. 118Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

FAVARIN, José Laércio et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 37, p. 769-773, 2002.

FERRAZ, G. A. E. S. et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**,13(1):76-89, 2012b.

FERRAZ, Gabriel Araújo e Silva et al. Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 1, p. 81-91, 2017.

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.

GEIPEL, Jakob; LINK, Johanna; CLAUPEIN, Wilhelm. Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote sensing*, v. 6, n. 11, p. 10335-10355, 2014.

GIONGO, Marcos et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231-231, 2010.

GIONGO, Marcos et al. LiDAR: princípios e aplicações na agricultura. 2022. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 10, n. 30, p. 30-50, 2010.

GONÇALVES. Estimativas de parâmetros biofísicos de lavoura de cafeeira a partir de imagens obtidas por aeronaves remotamente pilotadas.2018. Tese de Doutorado

HENDGES, Luciane et al. A agricultura e a agricultura familiar na educação profissional e tecnológica: análise do Projeto Médiotec e do Catálogo Nacional de Cursos Técnicos. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, v. 24, 2023.

HOLMAN, Fenner H. et al. High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1031, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. 2021. Disponível em:
[<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>]. Acesso em: 7 dez. 2021.

KARP, F. H. S.; Trevisan, R. G.; Colaço, A. F.; Molin, J. P. Utilização de sensor LiDAR na cultura do café: avaliação da variabilidade espacial de parâmetros geométricos de plantas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – CONBAP, 13., 2018, Curitiba. Anais... Curitiba: [nome da instituição responsável pela publicação], 2018. p.236

KRIEGEL, H.-P.; KRÖGER, P.; ZIMEK, A. Clustering high-dimensional data. **ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data**, v. 3, n. 1, p. 1–58, 1 mar. 2009.

LALIBERTE, A. et al. Sensoriamento remoto multiespectral de aeronaves não tripuladas: Imagem processamento de fluxos de trabalho e aplicativos para ambientes de pastagem. **Sensoriamento Remoto**, Piscataway, v. 3, n. 11, p. 2529-2551, nov. 2011.

LIMA, Fábio Leite et al. Zoneamento Agroclimático para a Cultura do Café em Minas Gerais. **Agropecuária Técnica**, v. 25, n. 2, p. 1-9, 2021.

LLOYD, S. Least squares quantization in PCM, *IEEE transactions on information theory* 28.2: 129-137, 1982.

LOPES, Paulo Rogério. A biodiversidade como fator preponderante para a produção agrícola em agroecossistemas cafeeiros sombreados no Pontal do Paranapanema. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LOPES, Paulo Rogério; KAGEYAMA, Paulo Yoshio; LOPES, Keila Cássia Santos Araújo. Sistemas agroflorestais e produção agroecológica de café na região do pontal do Paranapanema. **Retratos de Assentamentos**, v. 17, n. 1, p. 261-292, 2014.

LUNZ, A. M. P. Crescimento e produtividade do cafeeiro sombreado e a pleno sol. 2006. 143 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2006.

MARIN, D. B. et al. Sensoriamento remoto espectral na identificação e mapeamento de variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142-153, 2019.

MARIN, D. B. et al. Unmanned Aerial Vehicle to Evaluate Frost Damage in Coffee Plants. **PrecisionAgriculture**, v. 22, p. 1845-1860, 2021.

MARQUES, G. et al. Uso de imagens obtidas por VANT e câmera multiespectral para avaliação de índices de vegetação e estimativa de produtividade em uma lavoura cafeeira. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 2, p. 1-22, 2019.

Matiello JB, Almeida SR (2016) Deu geadas no cafezal, não façam podas já. Disponível em: <http://www.cccrj.com.br/revista/839/24.pdf>

MATTOS, Gilvano Geraldo et al. Os danos de geadas: conceitos, mecanismos e modelos desimulação. *Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao Prof. Doutor Dionísio Gonçalves*, p. 141-166, 2010.

MELO-ABREU, João Paulo; RIBEIRO, Augusto César. Os danos de geada: conceitos, mecanismos e modelos de simulação. *Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao Prof. Doutor Dionísio Gonçalves*, [S. l.], p. 141-166, 2010.

MENGUE, V. P. Utilização de séries temporais de imagens de moderada resolução espacial para monitoramento das mudanças do uso do solo e cobertura vegetal do bioma Pampa. 2018.

MESQUITA, Eduardo de Sá et al. Variabilidade espacial do índice de vegetação da diferença normalizada e sua relação com a produtividade de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 962-968, 2019.

MOORTHY, I.; MILLER, J. R.; BERNI, J. A. J.; ZARCO-TEJADA, P.; HU, B.; CHEN, J. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s.l.], v. 151, n.2, p. 204-214, fev. 2011.

NISHIWAKI, A. A. M.; MOURA, M. S. B.; GALVINCIO, J. D.; OLIVEIRA, C. P.; SILVA, E. A.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; MENEZES, R. S. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DOMINGUES, T. F. Uso do LiDAR na estimativa de atributos florestais: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 505-527, 2023.

NUNES, D. D.; ARAÚJO, A. R. d.; SOUSA, J. O. de; NETO, P. A. N. S. Zoneamento climático e potencial de produção da cafeicultura no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 5, p. 3775-3786, 2019.

OLIVEIRA, Ana Carolina Barcellos et al. Interação entre sistemas de colheita e níveis de desfolhamento em cafeeiros da cultivar IAC-125 RN. **Bragantia**, Campinas, v. 77, n. 4, p. 633-644, 2018.

OLIVEIRA, Angelica R. et al. Análise de crescimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) submetido à aplicação de trinexapac-etil. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 489-496, 2016.

OLIVEIRA, Ezequiel de et al. Influência da colheita mecanizada na produção cafeeira. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1466-1470, 2007.

ORTEGA, R. A. et al. Using non-tripulado aereovehículos para pastagens: Actual formulários e futuro potenciais. **Prática Ambiental**, Abingdon, v. 3, p. 159-168, julho 2006.

OSBORNE, J.& WATERS, E.(2002), "Four assumptions of multiple regression that researchers should always test". **Practical Assessment**, Research&Evaluation, 8, 2.

PAGLIAI, A.; SARRI, D.; LISCI, R.; LOMBARDO, S.; VIERI, M.; PERNA, C.; CENCINI, G.; DE PASCAL, V.; SILVA FERRAZ, G. A. Desenvolvimento de um algoritmo de avaliação de volumes de copa com LiDAR terrestre para implementação de pulverização de precisão em vinhedos. **Pesquisa Agrônômica**, v. 20, n. 2, p. 389-403, 2022.
<https://doi.org/10.15159/AR.21.159>

PANAGIOTIDIS, D.; ABDOLLAHNEJAD, A.; SUROVÝ, P.; CHITECULO, V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v.3, p.2392-2410, dez. 2016.

PARTELLI, Fábio Luiz et al. Low temperature impact on photosynthetic parameters of coffee genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1404-1415, 2009.

PAVANI, Luís Otávio. Inovação e modernização da agricultura brasileira: a dificuldade de inserção do agricultor familiar. 2022.

PEREIRA, Alexandro et al. Mapeamento de geadas nas regiões cafeeiras de Minas Gerais. 15º Jornada Científica e Tecnológica e 12º Simpósio de Pós-Graduação do IFSULDEMINAS, v. 15, n. 1, 2023.

PRIMICERIO, J. et al. Definição individual de planta e caracterização faltante de planta em vinhedos a partir de imagens de UAV de alta resolução. **Jornal Europeu de Sensoriamento Remoto**, Florença, v. 50, n. 1, p. 179-186, abr. 2017.

PRIMICERIO, J. et al. Um veículo aéreo não tripulado flexível para agricultura de precisão. **Precisão Agricultura**, Dordrecht, v. 4, p. 517-523, jan. 2012.

Qgis Development Team. QGIS Geographic Information System. **Open-Source Geospatial Foundation Project: Beaverton, OR, USA**, 2018.

R Core Team (2023). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

RAFAELLI, Débora Rosa. Geoprocessamento para a avaliação do impacto de geadas na região cafeeira de Cornélio Procópio. PR. 2004.

RAMALHO, JC; QUARTIN, VL; LEITÃO, E.; CAMPOS, PS; CARELLI, MLC; FAHL, JI; NUNES, MA Capacidade de aclimatação ao frio e fotossíntese entre espécies do gênero *Coffea* tropical. **Plant Biology**, v.5, p.631-641, 2003.

RANGO, A. et al. Usando não tripulado aéreo veículos para pastagens: atual formulários e futuro potenciais. **Prática Ambiental**, Abingdon, v. 3, p. 159-168, julho 2006.

ROSISCA, Juliandra Rodrigues et al. Parâmetros associados à resistência de genótipos de café a temperaturas negativas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 5, p. 2293-2308, 2022.

ROSSI, G. et al. Uso de imagens obtidas por aeronaves remotamente pilotadas e floresta aleatória para detecção de minador de folhas (*Leucoptera coffeella*) em cafeeiros recém-plantados. **Sensor Remoto** 2024, 16, 728. <https://doi.org/10.3390/rs16040728>.

SAKAI, A; LARCHER, W. Frost survival of plants: responses and adaptation to freezing stress. **Berlin: Springer-Verlag**, 1987. 321p.

SANTANA, L. S. et al. Precision coffee growing: A review. *Coffee Science*, p. 1-19, 2022.
SANTINATO, F. et al. Colheita mecanizada do café em lavouras de primeira safra. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1215-1219, 2015.

SANTOS, L. M. D.; FERRAZ, G. A. e S.; CARVALHO, M. A. d. F.; TEODORO, S. A.; CAMPOS, A. A. V.; MENICUCCI NETO, P. Utilização de Imagens RPA no Mapeamento do Índice de Clorofila de Café. **Sustentabilidade**, v. 14, p. 13118, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142013118>

SASAKI, T. et al. Estimation of leaf area index and canopy openness in broadleaved forest using an airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography. **Landscape and Ecological Engineering**, Tokyo, v. 4, p. 47-55, 2008.

SENTELHAS, Paulo et al, Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p.437-445, 1995. Disponível em: [[http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1995/1995_Bragantia_54\(2\)437-445_TminRelva.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1995/1995_Bragantia_54(2)437-445_TminRelva.pdf)]. Acesso em: 13 dez. 2021.

SOFFIATI, Arthur. Holoceno: época geológica e antrópica. Editora **Autografia**, 2022.

SOUZA, G. F. de et al. Zoneamento agroclimático e modelagem da produtividade do café (*Coffearabica* L.) na região sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 6, p. 663-676, 2017.

Souza, V. Q. D., Caron, B. O., Schmidt, D., Behling, A., Bamberg, R., & Vian, A. L. (2011). Resistência de espécies arbóreas submetidas a extremos climáticos de geada em diferentes sistemas agroflorestais. *Ciência Rural*, 41, 972-977.

TAIZ, Lincoln et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: **Artmed**, 2017. 858 p.

TATTARIS, M.; et al, Uma comparação direta de controle remoto abordagens de detecção para fenotipagem de alto rendimento no melhoramento de plantas. **Fronteiras na Planta Ciência**, Lausana, v. 1-9, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses. 5. ed. Lavras, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/58933>. Acesso em: data de acesso.

VALENTE, GISLAYNE FARIAS ; **FERRAZ, GABRIEL ARAÚJO E SILVA** ; SCHWERZ, FELIPE ; FARIA, RAFAEL DE OLIVEIRA ; FERNANDES, FELIPE AUGUSTO ; Marin, Diego Bedin . Remotely Piloted Aircraft for Evaluating the Impact of Frost in Coffee Plants: Interactions between Plant Age and Topography. *Remote Sensing JCR*, v. 16, p. 3467, 2024.

VALENTE et al. Avaliação de índice de vegetação na avaliação de danos por geada em cafeeiros de um ano. In: SIMPOSIO MINEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO UFV, 32, Lavras. Anais..., 2024. p. 1000-1257.

VALENTE, G. F.; FERRAZ, G. A. e. S.; SCHWERZ, F.; FARIA, R. d. O.; FERNANDES, F. A.; MARIN, D. B. Remotely Piloted Aircraft for Evaluating the Impact of Frost in Coffee Plants: Interactions between Plant Age and Topography. **Remote Sensing**, v. 16, p. 3467, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16183467>.

WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K. From single pulse to full waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. Geo-Imagery Bridging Continents: proceedings...Istanbul, 2004. p. 201-206. (International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 35, pt. B3). Commission 3. Disponível em: < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/267.pdf> >. Acesso em: 10 out. 2009.

WATSON, D. J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 4, p. 101-144, 1952.

XIANG, S.; CHEN, S.; WU, X.; XIAO, D.; ZHENG, X. Study on fast linear scanning for a new laser scanner. **Optics & Laser Technology**, v. 42, n. 1, p. 42-46, Feb. 2010