

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Modelos de estimativa de produtividade do cafeeiro por planta utilizando
índices fenológicos**

Gabriel Dumbá Monteiro de Castro
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

GABRIEL DUMBÁ MONTEIRO DE CASTRO

**Modelos de estimativa de produtividade do cafeeiro por planta utilizando
índices fenológicos**

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

Orientador: Daniel Marcal de Queiroz

Coorientadores: Domingos S. M. Valente
Diego Bedin Marin

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C355m
2025
Castro, Gabriel Dumbá Monteiro de, 1996-
Modelos de estimativa de produtividade do cafeeiro por
planta utilizando índices fenológicos / Gabriel Dumbá Monteiro
de Castro. – Viçosa, MG, 2025.
1 tese eletrônica (56 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 52-56.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.371>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Café - Cultivo. 2. Fenologia. 3. Agricultura de precisão.
4. Inovações agrícolas. I. Queiroz, Daniel Marçal de, 1957-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 22. ed. 633.73

GABRIEL DUMBÁ MONTEIRO DE CASTRO

Modelos de estimativa de produtividade do cafeeiro por planta utilizando índices fenológicos

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

APROVADA: 25 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Gabriel Dumbá Monteiro de Castro
Autor

Daniel Marcal de Queiroz
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 04/06/2025 às 17:58:21 e pelo orientador em 18/06/2025 às 16:09:21. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **I4MG.1JOT.SUND** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais, Edvaldo e Geralda,
aos meus amados irmãos, Guilherme e Renato,
à minha esposa, Maria Izabella,
e à minha filha, Maya.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre acreditaram e confiaram em mim, transmitindo os mais valiosos ensinamentos da vida.

Aos meus irmãos, pelo apoio incondicional e por sempre me encorajarem.

À minha esposa, pelo suporte constante e por estar ao meu lado em cada etapa desta jornada.

À minha filha, por trazer sentido à minha vida e por me dar forças nos momentos de dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Daniel Marçal de Queiroz, expresso minha mais sincera gratidão. Agradeço pela orientação, dedicação, conselhos e por acreditar no meu trabalho.

Aos meus coorientadores, Dr. Domingos Sárvio Magalhães Valente e Dr. Diego Bedin Marin, pela disponibilidade e cortesia sempre que precisei.

Ao aluno de iniciação científica, Ryan Moreira Borges, pelo auxílio essencial nos trabalhos práticos de campo.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar minha pós-graduação.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Samuel de Assis Silva e Dra. Flora Maria de Melo Villar, pela disponibilidade na avaliação deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

CASTRO, Gabriel Dumbá Monteiro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Modelos de estimativa de produtividade do cafeeiro por planta utilizando índices fenológicos**. Orientador: Daniel Marcal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sarvio Magalhaes Valente e Diego Bedin Marin.

A cafeicultura desempenha um papel essencial na economia global, sendo o Brasil o maior produtor mundial. Dada a relevância do setor, métodos eficazes de previsão de produtividade são essenciais para decisões estratégicas no setor produtivo e comercial. Assim, objetivou-se com este estudo desenvolver modelos de estimativa de produtividade de plantas de café com base em características fenológicas. Foram desenvolvidos dois índices: o índice fenológico de produtividade individual das plantas 1 (IFPI1), que utilizou a altura, largura da copa e média do número de frutos nos 4º e 5º nós plagiotrópicos, e o índice fenológico de produtividade das plantas 2 (IFPI2) que utilizou a altura, largura da copa e média do número de frutos do 1º ao 5º nós plagiotrópicos. Cada índice gerou um modelo de estimativa de produtividade (Modelo 1 e Modelo 2). O experimento foi conduzido em três talhões de café em Viçosa - MG, em que as plantas foram georreferenciadas e, 60 delas, selecionadas para avaliação. As variáveis fenológicas foram mensuradas em dois períodos distintos, dezembro/janeiro e fevereiro/março, com objetivo de avaliar o desempenho do modelo em diferentes épocas. Para obtenção da variável média do número de frutos do 1º ao 5º nós plagiotrópicos foram realizados registros fotográficos dos ramos, e desenvolvido um modelo de contagem automática de frutos de café baseado no Detectron2, uma biblioteca de código aberto para detecção de objetos. O modelo em questão obteve na etapa de treinamento uma precisão média de 93,24% para o período de dezembro/janeiro e 95,69% para o período de janeiro/fevereiro. Com as variáveis fenológicas obtidas, foram calculados os índices fenológicos específicos para cada período, os quais foram posteriormente integrados a análises de regressão linear simples. Para avaliar as estimativas, durante a colheita a produção de cada planta foi registrada individualmente nos talhões. Os resultados indicaram que os modelos finais apresentaram boa correlação com a produtividade, especialmente no período de fevereiro/março, no qual o Modelo 1 obteve coeficiente de determinação (R^2) de 0,889, raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,923 litros/planta e erro médio absoluto (MAE) de 0,635 litros/planta e o Modelo 2 com coeficiente de determinação (R^2) de 0,747, raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,374 litros/planta e erro médio absoluto (MAE) de 0,460 litros/planta. Por fim, foram gerados mapas de estimativa de produtividade

para cada talhão, inicialmente com os dados de produção real obtidos em campo e, em seguida, com as estimativas de cada modelo, considerando os dois períodos de estudo. A análise evidenciou uma relação significativa entre as estimativas baseadas nos dados de produção real e os modelos, destacando com precisão as áreas de alta e baixa produtividade nos talhões. Conclui-se que os modelos propostos se mostraram promissores para estimar a produtividade na cafeicultura, auxiliando na adaptação das práticas agrícolas às condições ambientais e na otimização do manejo. Tais ferramentas são essenciais para aumentar a resiliência do setor frente às mudanças climáticas, promovendo eficiência produtiva e sustentabilidade. Estudos futuros são recomendados para validar os modelos em diferentes condições climáticas e regiões produtoras.

Palavras-chave: cafeicultura; variáveis fenológicas; agricultura de precisão; agricultura digital

ABSTRACT

CASTRO, Gabriel Dumbá Monteiro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Models for estimating coffee plant productivity using phenological indices**. Adviser: Daniel Marcal de Queiroz. Co-advisers: Domingos Sarvio Magalhaes Valente and Diego Bedin Marin.

Coffee cultivation plays an important role in the global economy, with Brazil being the world's largest producer. Given the sector's significance, effective yield prediction methods are essential for strategic decision-making in the production and commercial sectors. This study aimed to develop yield estimation models for coffee plants based on phenological characteristics. Two indices were developed: the Individual Coffee Plant Phenological Yield Index 1 (IFPI1), which incorporated plant height, canopy width, and the average number of fruits in the 4th and 5th plagiotropic nodes, and the Individual Coffee Plant Phenological Yield Index 2 (IFPI2), which used plant height, canopy width, and the average number of fruits from the 1st to the 5th plagiotropic nodes. Each index generated a yield estimation model (Model 1 and Model 2). The experiment was conducted in three coffee fields in Viçosa, MG, where georeferenced plants were selected, and 60 plants were evaluated. Phenological variables were measured in two distinct periods, December/January and February/March, to assess model performance across different timeframes. To obtain the variable average number of fruits from the 1st to the 5th plagiotropic nodes, photographic records of branches were taken, and an automatic coffee fruit counting model was developed using Detectron2, an open-source object detection library. During the training phase, this model achieved an average precision of 93.24% for December/January and 95.69% for January/February. The phenological indices were then calculated for each period and integrated into simple linear regression analyses. To evaluate the estimates, individual plant production was recorded during harvest. The estimated results indicated that the final models showed a strong correlation with crop yield measurement done in field, particularly in the February/March period, where Model 1 achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.889, root mean square error (RMSE) of 0.923 liters/plant, and mean absolute error (MAE) of 0.635 liters/plant, while Model 2 presented an R^2 of 0.747, RMSE of 0.374 liters/plant, and MAE of 0.460 liters/plant. Lastly, yield estimation maps were generated for each field, initially using actual field production data and applying the estimates from each model for both study periods. The analysis revealed a significant relationship between the estimates based on actual production data and the models, accurately highlighting areas of high and low coffee

yield in the fields. The findings suggest that the proposed models are promising for estimating coffee yield, supporting the adaptation of agricultural practices to environmental conditions, and optimizing management strategies. These tools are essential for increasing the sector's resilience to climate change while promoting production efficiency and sustainability. Future studies are recommended to validate the models under different climatic conditions and coffee-producing regions

Keywords: coffee farming; phenological variables; precision agriculture; digital agriculture

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização dos talhões do experimento em Viçosa, MG	15
Figura 2 - Esquema de seleção das plantas para avaliação no experimento.....	17
Figura 3 - Localização do primeiro ao quinto internódio produtivo em um ramo plagiotrópico da planta de café (A) e os internódios produtivos utilizados para desenvolvimento de cada um dos modelos de estimativa de produtividade (B)	19
Figura 4 - Esquema de seleção dos ramos plagiotrópicos na planta de café.....	20
Figura 5 - Fluxograma de desenvolvimento do modelo de contagem automática de frutos do 1º ao 5º internódio	22
Figura 6 - Medição do peso dos frutos de uma planta de café utilizando balança digital portátil (A) e do volume de frutos utilizando balde volumétrico graduado (B)	24
Figura 7 - Representação da área vegetal produtiva de uma planta de café	25
Figura 8 - Ortomosaico dos talhões de estudo com as plantas de café georreferenciadas	29
Figura 9 - Histograma da média de frutos por planta nos 4º e 5º nós durante o período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024	30
Figura 10 - Histograma da média de frutos por planta nos 4º e 5º nós durante o período de fevereiro a março de 2024.....	30
Figura 11 - Histograma da altura das plantas registrada durante o período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024.....	31
Figura 12 - Histograma da altura das plantas registrada durante o período de fevereiro a março de 2024	31
Figura 13 - Histograma da largura da copa das plantas.....	32
Figura 14 - Aplicação do modelo em uma nova imagem para identificação automática de frutos presentes no 1º ao 5º nó de um ramo plagiotrópico de café	35
Figura 15 - Histograma da média de frutos do 1º ao 5º nó por planta durante o período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024.....	36
Figura 16 - Histograma da média de frutos do 1º ao 5º nó por planta durante o período de fevereiro a março de 2024.....	36
Figura 17 - Histograma de produção de todas as plantas dos talhões.....	37

Figura 18 - Histograma de produção das plantas selecionadas para avaliação.....	38
Figura 19 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas 1 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de dezembro/janeiro.....	40
Figura 20 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas 1 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de fevereiro/março	40
Figura 21 - Modelos finais de regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas 1 e a produção por planta para todos os talhões, nos períodos de dezembro/janeiro (a) e fevereiro/março (b)	41
Figura 22 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas 2 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de dezembro/janeiro.....	42
Figura 23 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas 1 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de fevereiro/março	42
Figura 24 - Modelos finais de regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas 2 e a produção por planta para todos os talhões, nos períodos de dezembro/janeiro (a) e fevereiro/março (b)	43
Figura 25 - Mapas de estimativa de produtividade do café para o Talhão A, com dados de produção real e previsões dos Modelos 1 e 2 nos períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março	48
Figura 26 - Mapas de estimativa de produtividade do café para o Talhão B, com dados de produção real e previsões dos Modelos 1 e 2 nos períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março	48
Figura 27 - Mapas de estimativa de produtividade do café para o Talhão C, com dados de produção real e previsões dos Modelos 1 e 2 nos períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais dos talhões do experimento	16
Tabela 2 - Hiperparâmetros selecionadas para cada modelo.....	33
Tabela 3 - Resultado das métricas de desempenho da validação cruzada e do treinamento final do modelo para os períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março	34
Tabela 4 - Resumo da colheita nos talhões.....	39
Tabela 5 - Métricas de desempenho dos modelos de estimativa de produtividade individual das plantas	44
Tabela 6 - Parâmetros da interpolação definidos dos modelos de estimativa de produtividade de café para cada talhão	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1	Local do Experimento	15
2.2	Coleta de dados	16
2.2.1	Seleção de plantas para análise	16
2.2.2	Georreferenciamento das plantas	17
2.2.3	Seleção dos atributos fenológicos utilizados nos modelos.....	18
2.2.4	Coleta dos atributos fenológicos das plantas	19
2.2.5	Modelo automatizado de contagem de frutos do 1º ao 5º internódio produtivo dos ramos plagiotrópicos da planta de café.....	21
2.2.6	Colheita	24
2.3	Desenvolvimento dos índices fenológicos para estimativa de produtividade 25	
2.4	Ajuste dos modelos de predição de produtividade de café com base nos índices fenológicos.....	26
2.5	Mapeamento da produtividade de café e estimativa espacial dos modelos	27
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1	Ortomosaico e georeferenciamento das plantas dos três talhões da área experimental.....	28
3.2	Atributos fenológicos das plantas utilizadas no desenvolvimento dos modelos de predição de produtividade	29
3.3	Modelo automatizado de contagem de frutos do 1º ao 5º internódio produtivo dos ramos plagiotrópicos das plantas café	33
3.4	Produtividade de café dos três talhões estudados.....	37
3.5	Desenvolvimento dos modelos de estimativa de produtividade individual das plantas	39
3.5.1	Modelo 1 de estimativa de produtividade individual das plantas	39
3.5.2	Modelo 2 de estimativa de produtividade individual das plantas	41
3.5.3	Métricas de desempenho dos modelos de estimativa de produtividade individual das plantas.....	43
3.6	Mapeamento e estimativa espacial da produtividade do café com os modelos de predição individual das plantas	46
4	CONCLUSÕES	51
5	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura desempenha um importante papel na economia global, sendo uma das commodities agrícolas mais comercializadas e fonte vital de renda para milhões de produtores em países tropicais (FAO, 2023). Em 2024, a produção global de café foi estimada em 176,2 milhões de sacas de 60 kg, um crescimento de 3,7% em relação ao ano anterior (ICO, 2024). O Brasil, maior produtor mundial, contribuiu com 54,79 milhões de sacas beneficiadas em 2024, representando um aumento modesto de 0,5% comparado a 2023 (CONAB, 2024). O crescimento da produção tem sido impulsionado por avanços tecnológicos no manejo agrícola, expansão de áreas cultivadas, práticas sustentáveis e condições climáticas favoráveis (DAMATTA et al., 2019). Entretanto, os produtores são desafiados a equilibrar crescimento e sustentabilidade, adotando práticas que garantam maior eficiência econômica, conservação dos recursos naturais e estabilidade a longo prazo.

Nesse contexto, modelos de estimativa de produtividade na cafeicultura se tornaram uma ferramenta estratégica para otimizar a gestão e aumentar a resiliência da cadeia produtiva (SANOU et al., 2023). Ao prever a produção futura, esses modelos permitem ajustar práticas de manejo, alocar recursos de forma mais eficiente e planejar a comercialização. Além disso, possibilitam identificar padrões de variação na produtividade e antecipar riscos, como quebras de safra ou oscilações na oferta, permitindo ações preventivas e melhor adaptação às condições do mercado. Além disso, a integração das informações geradas por esses modelos com dados históricos de cultivo viabiliza o desenvolvimento de sistemas personalizados e ferramentas de agricultura de precisão, como mapas de produtividade. Essas ferramentas aprimoram o manejo no campo, otimizam o uso de recursos e facilitam o planejamento logístico e comercial em diversos contextos produtivos (QUEIROZ et al., 2022).

Ao longo das últimas décadas, diversos modelos de previsão de produtividade têm sido desenvolvidos, abrangendo fatores climáticos, fenológicos e agrônômicos. Picini et al. (1999) e Camargo et al. (2003) destacaram a importância de variáveis como evapotranspiração e condições climáticas históricas. Santos (2006) refinou essas abordagens, incorporando coeficientes de sensibilidade para eventos adversos, como geadas. Embora esses modelos tenham trazido contribuições significativas em níveis regionais e de propriedade, ainda existem lacunas na escala micro, em que há

potencial para capturar detalhes individuais das plantas capazes de impactar diretamente a produtividade.

A hierarquia de sistemas, proposta por Costa (1997), organiza diferentes níveis de análise: região, município, propriedade, talhão, planta, órgãos e tecido. Embora modelos em níveis amplos, como talhão e propriedade, sejam úteis, a falta de estudos que buscam analisar a produtividade do cafeeiro em nível de planta limita a capacidade de identificar os efeitos de estresses climáticos e agronômicos específicos, comprometendo a compreensão detalhada da resposta fisiológica das plantas. Essa lacuna prejudica o desenvolvimento de estratégias de manejo mais precisas e adaptadas às necessidades reais da cultura, reduzindo o potencial para maximizar a lucratividade e a sustentabilidade do cultivo do café (SILVA, 1956; TOSELO e ARRUDA, 1962; PICINI et al., 1999; CAMARGO et al., 2003).

Diante disso, estudos recentes sugerem que modelos preditivos com base em características fenológicas das plantas podem melhorar a precisão na estimativa de produtividade, além de auxiliar na identificação precoce de fatores limitantes ao desenvolvimento da cultura (RAHN et al., 2014; FISCHERSWORRING et al., 2015; QIAO et al., 2022). Essas características são transformadas em índices fenológicos, que resultam de operações matemáticas entre os parâmetros observados. Eles se tornam particularmente valiosos porque refletem os estresses climáticos (como déficits hídricos) e agronômicos (como déficits nutricionais) que a planta experimentou em estágios anteriores de seu desenvolvimento. Essa abordagem possibilita análises detalhadas, permitindo adaptações específicas às condições individuais das plantas e favorecendo a adaptabilidade da cafeicultura frente às mudanças climáticas.

Porém, apesar da eficiência desses modelos, um dos maiores desafios para seu desenvolvimento é a obtenção das características fenológicas das plantas, que, frequentemente, exigem métodos manuais demorados e dispendiosos em termos de mão de obra. Essa limitação restringe a aplicação em larga escala e a agilidade necessária para análises mais dinâmicas. No entanto, os avanços no uso de imagens digitais e veículos aéreos não tripulados (VANTs) abrem novas possibilidades para superar esse obstáculo. Combinando essas tecnologias à inteligência artificial, é possível automatizar a coleta e a análise de dados fenológicos, permitindo, por exemplo, a identificação precisa de características como altura da planta, volume da copa e número de frutos nos ramos (ERON et al., 2024). Além de reduzir o custo e o tempo envolvidos no processo, essa abordagem oferece maior consistência e

precisão nas medições, mesmo em áreas extensas e de difícil acesso. A integração dessas ferramentas à modelagem preditiva pode revolucionar a forma como se monitora e se prevê a produtividade na cafeicultura, tornando o processo mais eficiente, escalável e acessível aos produtores.

Dessa forma, foi proposto neste estudo o desenvolvimento de modelos para estimar a produtividade do café a nível de planta, com base em índices fenológicos. Os modelos têm como objetivo identificar a produção de cada planta individualmente dentro de um talhão, criando um sistema de estimativa de produtividade adaptável a diferentes contextos. Assim, busca-se oferecer aos produtores e pesquisadores uma ferramenta simples, eficiente e precisa para a previsão da produtividade do cafeeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do Experimento

O experimento foi conduzido no viveiro de café da Universidade Federal de Viçosa (UFV), situado no município de Viçosa, Minas Gerais, região cafeeira das Matas de Minas. Para a seleção dos talhões destinados ao estudo, foram realizadas visitas técnicas ao local, durante as quais foram analisados critérios, como: histórico da área, dimensões dos talhões e número de plantas. Com base nessas análises, foram selecionados três talhões, denominados Talhão A, Talhão B e Talhão C (Figura 1). Foram levantadas características gerais dos talhões para descrever de forma mais detalhada as áreas em estudo (Tabela 1).

Figura 1 - Localização dos talhões do experimento em Viçosa, MG

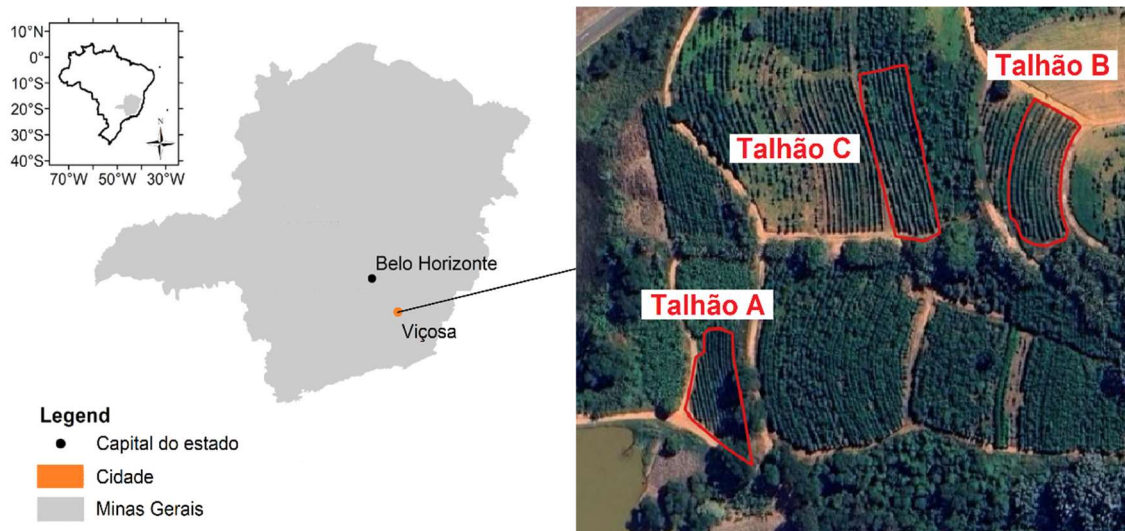


Tabela 1 - Características gerais dos talhões do experimento

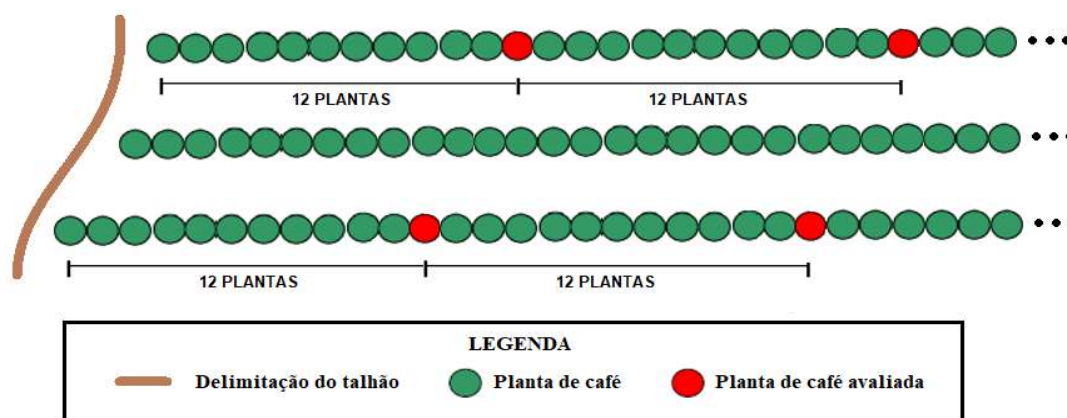
Característica	Talhão A	Talhão B	Talhão C
Área (ha)	0,14	0,18	0,22
Cultivar	Catuaí IAC 44	Catuaí IAC 44	Arara/Catimor
Nº de plantas	1000	800	800
Espaçamento (m)	2 x 0,7	2,5 x 0,7	2,5 x 1,0
Densidade de plantas (plantas.ha ⁻¹)	7143	4444	3636
Idade (anos)	4	4	8
Altitude (m)	665	708	685
Coordenadas geográficas	42° 50' 59,77" O 20° 44' 39,10" S	42° 50' 54,17" O 20° 44' 35,42" S	42° 50' 56,50" O 20° 44' 35,64" S

2.2 Coleta de dados

2.2.1 Seleção de plantas para análise

Para a coleta de dados do experimento foi necessário selecionar plantas representativas dentro de cada talhão para realização das avaliações. Com base na área média dos talhões, foi determinado 20 plantas para a análise, visando representar o comportamento do talhão, ao todo foram analisadas 60 plantas. Essas plantas foram demarcadas com fitas vermelhas, garantindo que elas fossem avaliadas em diferentes períodos ao longo do experimento, assegurando a consistência e a reprodutibilidade dos dados coletados. O critério de seleção das plantas consistiu em escolher uma planta para análise a cada 12 plantas, continuando esse processo até o final da linha. A seleção ocorreu em linhas alternadas, de modo a finalizar quando totalizou 20 plantas escolhidas no talhão (Figura 2).

Figura 2 - Esquema de seleção das plantas para avaliação no experimento



2.2.2 Georreferenciamento das plantas

Todas as plantas analisadas no estudo foram georreferenciadas com o equipamento GNSS RTK, modelo T10 (fabricado por Topomap Nova Lima, Brasil). Utilizou-se o método de pós-processamento, no qual um receptor foi configurado como base fixa, enquanto o outro funcionou como receptor móvel (rover). A base foi instalada em um ponto fixo dentro da área de estudo e, ao longo da coleta, suas coordenadas foram registradas continuamente para posterior correção. O rover foi utilizado para percorrer os talhões, registrando a posição de cada planta individualmente, marcada como um ponto georreferenciado.

Após a coleta, os dados dos receptores base e rover foram transferidos e processados na ferramenta Topcon Tools versão 8.2.3 para o ajuste das coordenadas e correção diferencial. Esse processo de pós-processamento assegura maior precisão e confiabilidade nas localizações geográficas obtidas, essencial para análises detalhadas em estudos de campo. O uso desse tipo de equipamento e de processamento permite alcançar um erro de posicionamento geralmente entre 1 e 3 centímetros (HOFFMANN-WELLENHORF et al., 2008).

No intuito de aprimorar a visualização do georreferenciamento das plantas e acrescentar mais uma camada de informações ao experimento, foi realizado no mês de fevereiro de 2024, um voo com um veículo aéreo não tripulado (VANT), modelo Matrice 350 RTK da marca DJI com câmera MicaSense RedEdge-P. Cada um dos três talhões foi sobrevoado a uma altura de 80 metros, com sobreposição frontal e

lateral de 80%. As imagens capturadas foram processadas no software Pix4D Mapper versão 4.9.0, gerando assim os ortomosaicos dos talhões do estudo.

2.2.3 Seleção dos atributos fenológicos utilizados nos modelos

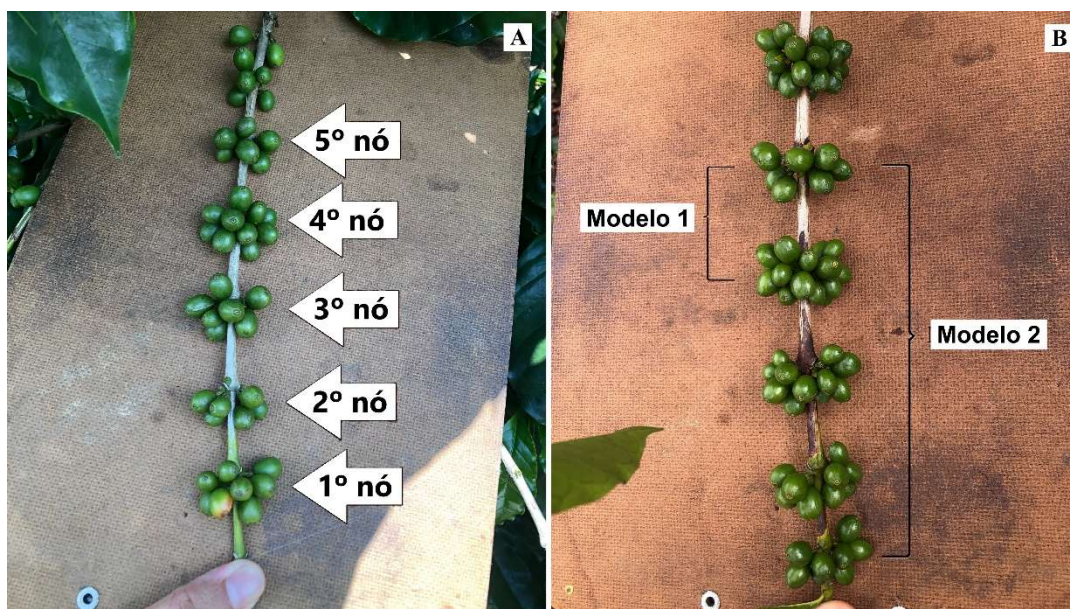
Para desenvolvimento do modelo de estimativa de produtividade do café, utilizando a hierarquia em nível de planta, os atributos fenológicos selecionados no experimento basearam-se nos estudos de Fahl et al. (2005) e Alfonsi (2008). Esses autores propuseram o uso de índices fenológicos para estimativa de produtividade em nível de talhão, considerando a altura das plantas, o espaçamento utilizado no talhão e a média do número de frutos no quarto e quintos internódios produtivos.

Sendo assim, o presente trabalho adotou duas propostas para desenvolvimento dos modelos, gerando dois índices fenológicos distintos. No Modelo 1 foi utilizado como atributo fenológico principal a média do número de frutos no quarto e quintos internódios produtivos. Esse atributo é considerado relevante porque reflete diretamente a produtividade do cafeeiro, uma vez que abrange a parte do ramo plagiotrópico que cresceu no ano anterior e que está contribuindo para a safra atual. Esses internódios representam, de forma aproximada, a média do número de frutos nos demais internódios produtivos do mesmo ano (FAHL et al., 2005; ALFONSI, 2008). O quarto internódio produtivo é identificado a partir do primeiro internódio com fruto no ápice do ramo, seguido pelo quinto internódio (Figura 3-A).

Já no Modelo 2, buscou-se aprimorar essa abordagem ao utilizar como atributo fenológico principal a média do número de frutos total do ramo até o quinto internódio produtivo. Essa modificação permite integrar não apenas as informações dos internódios já reconhecidos como indicadores diretos de produtividade, mas também dos demais nós do ramo (1º, 2º e 3º nós), ampliando os dados fenológicos considerados (Figura 3-B). A inclusão do número total de frutos até o quinto internódio visa tornar o modelo mais eficiente, possibilitando a coleta de maneira mais abrangente dos fatores que influenciam a produtividade.

Adicionalmente, a utilização do número total de frutos no ramo, o Modelo 2 apresenta vantagens práticas, uma vez que essa variável pode ser facilmente obtida por meio de imagens digitais. Isso simplifica o processo de análise, já que o modelo precisaria apenas contar os frutos, dispensando a necessidade de identificar e correlacionar cada fruto com os respectivos nós. Essa abordagem reduz a complexidade e pode aumentar a eficiência na coleta e processamento dos dados.

Figura 3 - Localização do primeiro ao quinto internódio produtivo em um ramo plagiotrópico da planta de café (A) e os internódios produtivos utilizados para desenvolvimento de cada um dos modelos de estimativa de produtividade (B)



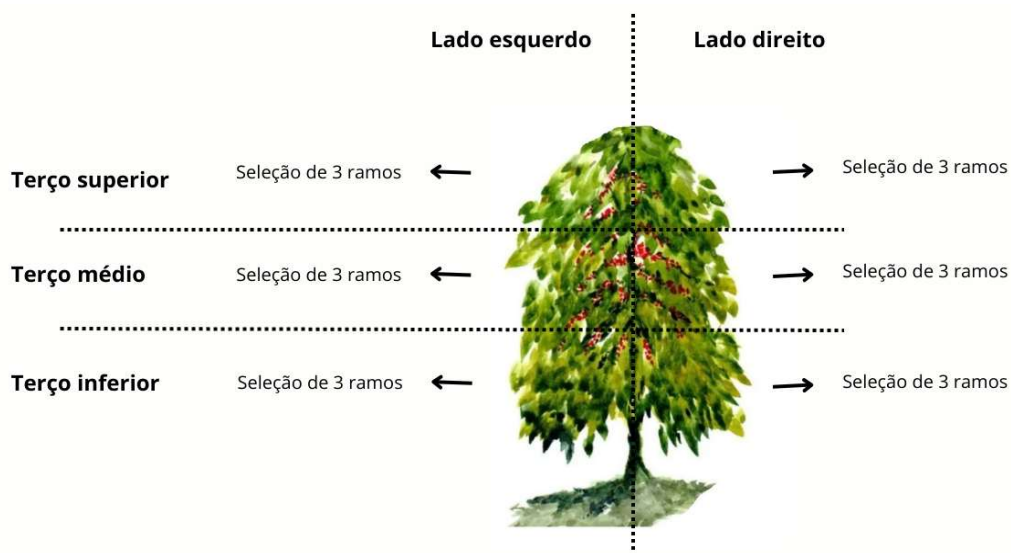
Para ambos os modelos, também foram selecionados os atributos fenológicos altura da planta e largura da copa ao longo da linha, pois essas características estão diretamente relacionadas à capacidade produtiva da planta. A altura da planta reflete seu vigor vegetativo e potencial para sustentar estruturas reprodutivas, enquanto a largura da copa influencia diretamente a interceptação de luz solar e o desenvolvimento de área fotossintética, fatores fundamentais para o acúmulo de reservas e a formação de frutos (PEREIRA et al., 2011). Além disso, essas variáveis permitem identificar padrões de desenvolvimento heterogêneos ao longo do talhão, contribuindo para análises mais detalhadas e assertivas da produtividade.

2.2.4 Coleta dos atributos fenológicos das plantas

Dessa forma, a coleta de dados do experimento envolveu a obtenção dos seguintes atributos fenológicos de cada uma das plantas selecionadas para avaliação: medição da altura (nível do solo até o ápice do ramo ortotrópico da planta), largura da copa ao longo da linha de café, contagem do número de frutos no quarto e quinto internódio produtivo e registro fotográfico de imagem abrangendo do primeiro ao quinto internódio produtivo em 18 ramos plagiotrópicos da planta. Para seleção dos

ramos na planta, foram feitas subdivisões, sendo escolhidos nove ramos de cada lado da planta, tendo a linha de plantio como referência (lado esquerdo e lado direito), e três ramos de cada terço, sendo dividido em terço superior, médio e inferior (Figura 4).

Figura 4 - Esquema de seleção dos ramos plagiotrópicos na planta de café



A altura das plantas foi determinada utilizando uma régua de três metros de comprimento com divisão de escala de um centímetro. A contagem dos frutos do quarto e quintos internódios produtivos foi feita manualmente, por meio de visitas diárias aos talhões, ao longo dos períodos de coleta. Em cada planta, os 18 ramos plagiotrópicos analisados foram demarcados com fita, e a contagem foi feita anotando os dados em uma planilha de campo. Posteriormente, esses dados foram transferidos para uma planilha digital para realização das análises.

A largura da copa foi obtida a partir da imagem georreferenciada das plantas. Para cada planta selecionada, mediu-se a distância entre a planta imediatamente anterior e a planta imediatamente posterior, dividindo o valor por dois para determinar a largura da copa, ao longo da linha, da planta em questão.

As avaliações em campo foram realizadas em dois períodos, nas quais, em cada período, as mesmas 60 plantas e os mesmos ramos foram analisados. O primeiro período de avaliação ocorreu entre dezembro de 2023 e janeiro de 2024 e, o segundo, entre fevereiro de 2024 e março de 2024. O objetivo de realizar a avaliação em dois períodos foi analisar o desempenho do modelo em diferentes épocas, uma vez que estimativas de produtividade obtidas com antecedência à colheita tornam o

planejamento agrícola mais eficiente. Isso permite uma melhor alocação de recursos, organização da mão de obra e definição de estratégias de manejo mais precisas.

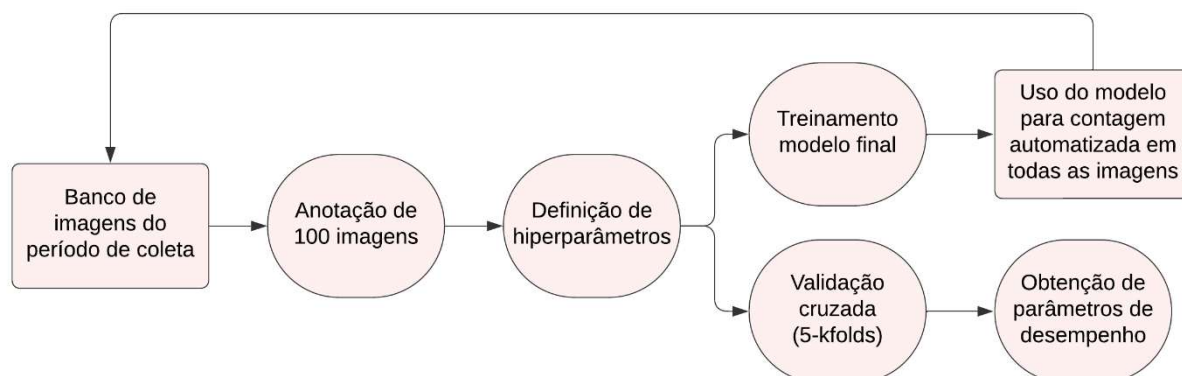
Para o registro fotográfico dos ramos plagiotrópicos, foi utilizada a câmera digital do *smartphone Apple iPhone 8*, com resolução de 12 megapixels (4608x2592 pixels) e configuração automática de exposição e foco. As imagens foram capturadas a uma distância média de 30 cm, sempre com o objetivo de abranger na imagem do primeiro ao quinto internódio produtivo. Para assegurar a individualização dos ramos e evitar o excesso de ruído na imagem, foi utilizado um aparato posicionado atrás do ramo, isolando-o e criando um fundo neutro que facilitou a visualização do ramo selecionado. A câmera foi posicionada sempre perpendicularmente aos ramos, o que contribuiu para a minimização de distorções e a maximização da qualidade visual dos registros.

2.2.5 Modelo automatizado de contagem de frutos do 1º ao 5º internódio produtivo dos ramos plagiotrópicos da planta de café

A contagem dos frutos do 1º ao 5º internódio produtivo foi realizada de forma automática utilizando o Detectron2, uma biblioteca de código aberto para detecção de objetos e segmentação de imagens, desenvolvida pelo *Facebook AI Research* (WU et al., 2019). Esse processo foi baseado no uso de redes neurais profundas, treinadas para identificar e contar os frutos em diferentes estágios de desenvolvimento. Para isso, foram anotados manualmente todos os frutos em 100 imagens aleatórias de cada período de coleta (dezembro/janeiro e fevereiro/março), resultando em modelos de contagem específicos para cada período.

Inicialmente, essas imagens anotadas foram utilizadas para definir os hiperparâmetros do modelo, seguidos pelo treinamento do modelo final e validação cruzada. Por fim, o modelo final foi então aplicado a todas as imagens de cada período, realizando a contagem automatizada dos frutos. Na Figura 5 é ilustrado em um fluxograma o passo-a-passo para desenvolvimento do modelo. Em todas as etapas, utilizou-se a arquitetura Mask R-CNN pré-treinada, ajustada para as características do estudo, assegurando maior precisão na detecção e contagem dos frutos nos diferentes estágios de desenvolvimento.

Figura 5 - Fluxograma de desenvolvimento do modelo de contagem automática de frutos do 1º ao 5º internódio produtivo



As métricas utilizadas para avaliação do desempenho do modelo foram: precisão média (AP), precisão média a 50% (AP50), precisão média a 75% (AP75) e o F1-Score. A AP é uma métrica fundamental para avaliar o desempenho geral do modelo, considerando a média da precisão em diferentes limiares de confiança. A precisão média a 50% (AP50) e a precisão média a 75% (AP75), por sua vez, avaliam a precisão em limites específicos de sobreposição (IoU), ajudando a identificar a capacidade do modelo de detectar objetos com maior ou menor rigor. O F1-Score, calculado normalmente como uma média harmônica entre precisão e recall, fornece uma avaliação balanceada do desempenho do modelo (ZAIDI et al., 2022). No presente estudo, o F1-Score foi calculado de maneira simplificada (Equação 1), levando em consideração a AP e a AP50. Essa abordagem está alinhada ao conceito geral do F1-Score descrito por Powers (2011), sendo adaptada para integrar métricas amplamente utilizadas em modelos de detecção. Embora o recall não tenha sido calculado diretamente, ele é implicitamente considerado na análise das métricas de precisão, que servem como parâmetros para otimizar o desempenho do modelo de detecção de objetos.

$$F1_Score = \frac{2 AP AP50}{AP + AP50} \quad (1)$$

Em que:

F1_Score = métrica de desempenho F1-Score;

AP = precisão média;

AP50 = precisão média a 50%.

A otimização dos hiperparâmetros do modelo de contagem automática de frutos foi conduzida para identificar a combinação que proporcionasse os melhores resultados. Para isso, o conjunto de imagens anotadas foi dividido em dois subconjuntos: treinamento e validação, sendo 80% dos dados reservados para treinamento e 20% para validação.

A busca pelos hiperparâmetros ideais foi realizada por meio do método de busca em grade, testando diferentes combinações de taxa de aprendizado (0,0001, 0,00025, 0,00075 e 0,001), tamanho do batch por iteração (1, 2, 3 e 4), número máximo de iterações (2000 e 5000) e tamanho do batch por imagem na região de interesse (128 e 256). Durante cada iteração de treinamento, o desempenho do modelo foi avaliado no conjunto de validação utilizando as métricas de AP e suas variantes AP50 e AP75. A configuração que apresentou as melhores métricas de desempenho para segmentação foi selecionada como a melhor, e seus valores foram registrados para as análises posteriores.

Após a definição dos melhores hiperparâmetros, foi realizada a validação cruzada utilizando o método k-fold, com $k = 5$. Nessa etapa, o dataset de imagens anotadas foi aleatoriamente dividido em cinco partes e, em cada uma das cinco iterações, quatro partes foram usadas para treinamento e uma para validação. As métricas de desempenho AP, AP50, AP75 e F1-Score foram registradas em cada iteração, e a média dessas métricas representou o resultado final da validação cruzada. Essa etapa teve como objetivo fornecer uma avaliação confiável da capacidade de generalização do modelo, assegurando que os resultados refletissem sua eficácia em dados não vistos e sua robustez em diferentes cenários.

O treinamento do modelo final foi realizado utilizando todas as 100 imagens anotadas, sem divisão para validação, tendo em vista que esta já foi realizada previamente por meio de validação cruzada. Após a conclusão do treinamento, as métricas de desempenho AP, AP50, AP75 e F1-Score foram calculadas para avaliar a eficácia do treinamento do modelo final. Por fim, as configurações e os pesos do modelo, que representam os parâmetros aprendidos durante o treinamento, foram salvos para possibilitar sua utilização em etapas posteriores.

Ao término do processo, os modelos finais treinados foram utilizados para realizar a contagem dos frutos do 1º ao 5º internódio em todas as imagens do banco de dados, correspondentes ao seu respectivo período de coleta (dezembro/janeiro ou fevereiro/março). O *script* final, além de exibir a imagem analisada com os frutos

identificados, gera um arquivo CSV para cada planta, contendo a contagem de frutos registrada em cada um dos 18 ramos plagiotrópicos avaliados. A partir desses arquivos CSV foi calculada a média do número de frutos do 1º ao 5º internódio para cada planta.

2.2.6 Colheita

Durante o período da colheita, foi realizado o registro individual de produção de todas as plantas nos Talhões A e B, além das plantas selecionadas no Talhão C. A colheita foi realizada da seguinte forma: dois profissionais contratados derriçavam os frutos do cafeeiro, cada um de um lado da planta, e colocavam os frutos de cada planta em uma sacola plástica. Em seguida, eram realizadas duas medições (Figura 6), o volume total dos frutos, utilizando um balde com escala de volumes, e o peso total dos frutos, medido com uma balança digital portátil, modelo STC-01 (fabricado por INLuss Belo Horizonte, Brasil).

Figura 6 - Medição do peso dos frutos de uma planta de café utilizando balança digital portátil (A) e do volume de frutos utilizando balde volumétrico graduado (B)



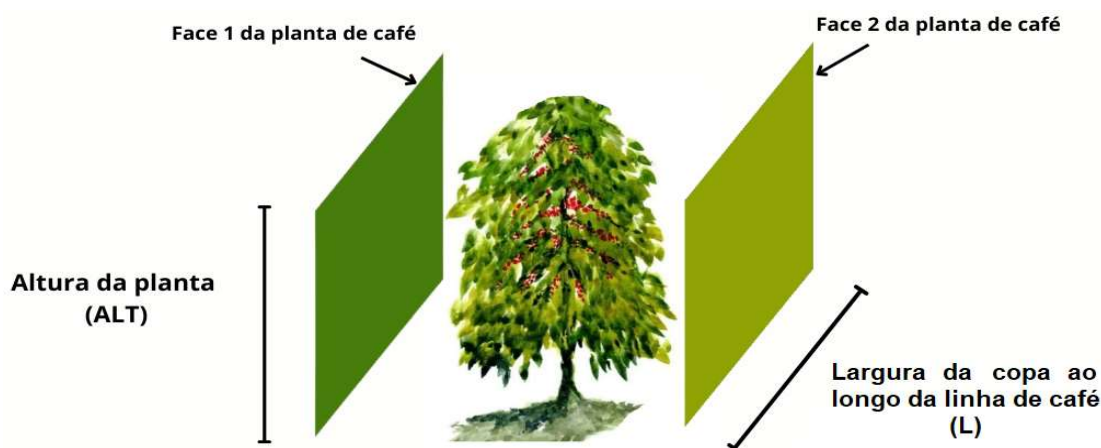
Embora tenham sido coletados dados de colheita em peso e volume, optou-se por apresentar os resultados, ao longo deste trabalho, em volume (litros), uma vez que essa é a unidade mais comumente utilizada. Dessa forma, a unidade de produtividade adotada ao longo do trabalho foi litros/planta. Essa convenção facilita a comparação e a interpretação dos resultados, alinhando-se às práticas padrões do setor.

2.3 Desenvolvimento dos índices fenológicos para estimativa de produtividade

Os dois índices fenológicos desenvolvidos para estimativa da produtividade individual do cafeeiro basearam-se no modelo de Fahl et al. (2005), que utiliza, em nível de talhão, o conceito de área vegetal produtiva (AVP) por hectare. A AVP representa uma área produtiva idealizada de uma lavoura em renque, e é calculada pelo comprimento das linhas de café por hectare multiplicado pelo dobro da altura média das plantas, considerando as duas faces do renque. O índice fenológico de Fahl et al. (2005) resulta então da multiplicação da AVP pela média de frutos no quarto e quinto internódio produtivo, e apresentou resultados satisfatórios em estudos anteriores (ALFONSINI, 2008; OLIVEIRA, 2007; MIRANDA et al., 2014).

Neste trabalho, substituiu-se o cálculo da área vegetal produtiva por hectare de café pelo cálculo da área vegetal produtiva por planta (AVPP). Nesse cálculo, multiplica-se a largura da copa ao longo da linha pela altura da planta e, em seguida, por dois, para considerar ambas as faces da planta (Figura 7). A AVPP foi calculada para ambos os modelos conforme Equação (2).

Figura 7 - Representação da área vegetal produtiva de uma planta de café



Para o índice fenológico do Modelo 1, a variável fenológica principal é a média do número de frutos presentes no 4º e 5º nós produtivos (Figura 3b), que foi obtida com a contagem manual para cada planta, com base nos dados coletados de 18 ramos plagiotrópicos por planta. Dessa maneira, o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 1 (IFPP1) foi calculado multiplicando a média do número de frutos do 4º e 5º nós produtivos dos ramos plagiotrópicos pela AVPP, conforme a Equação (3).

Para o índice fenológico do Modelo 2, a variável fenológica principal é a média do número de frutos presente do 1º a 5º internódio produtivo (Figura 3b), obtida por contagem automática utilizando o Detectron2, com base nos dados coletados de 18 ramos plagiotrópicos por planta. Dessa maneira, o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 2 (IFPP2) foi calculado multiplicando a média do número de frutos do 1º ao 5º nó produtivo dos ramos plagiotrópicos pela AVPP, conforme a Equação (4).

$$AVPP = 2 ALT L \quad (2)$$

$$IFPP1 = AVPP MF45 \quad (3)$$

$$IFPP2 = AVPP MF12345 \quad (4)$$

Em que:

AVPP = área vegetal produtiva de uma planta de café, em m²;

ALT = altura da planta, em metros;

L = largura da copa ao longo da linha de café, em metros.

IFPP1 = índice fenológico de produtividade individual das plantas 1;

MF45 = média do número de frutos presentes no 4º e 5º nós produtivos do ramo plagiotrópico contados a partir do ápice;

IFPP2 = índice fenológico de produtividade individual das plantas 2;

MF12345 = média do número de frutos presentes do 1º ao 5º nó produtivo do ramo plagiotrópico contados a partir do ápice.

2.4 Ajuste dos modelos de predição de produtividade de café com base nos índices fenológicos

Para analisar a relação entre os índices fenológicos e a produtividade (litros/planta), foram propostos modelos de regressão linear simples para cada talhão (A, B e C) em cada um dos dois períodos avaliados (dezembro/janeiro e fevereiro/março). Posteriormente foi desenvolvido um modelo final para cada período considerando todas as plantas avaliadas dos três talhões.

O ajuste das equações das regressões seguiu conforme o modelo representado pela Equação (5). A estimativa dos parâmetros β de cada modelo foi feita pelo método dos mínimos quadrados (DRAPER e SMITH, 1981). O desempenho de cada modelo desenvolvido foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e erro médio absoluto (MAE).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i \quad (5)$$

Em que:

y_i = valor observado da variável dependente (produção da planta de café, em L);

β_0 = coeficiente linear ou intercepto da equação;

β_1 = coeficiente angular ou de regressão;

x_i = valor da variável independente (índice fenológico de produtividade individual das plantas – IFPP1 ou IFPP2);

e_i = erro aleatório associado a cada observação.

2.5 Mapeamento da produtividade de café e estimativa espacial dos modelos

A partir dos modelos desenvolvidos para cada talhão e dos dados de produtividade (litros/planta) das 60 plantas selecionadas em campo, foi realizada uma análise geoespacial para a geração de mapas de estimativa de produtividade. Essa análise, conduzida no software QGIS 3.34, consistiu na atribuição da produção real registrada a cada planta georreferenciada, seguida das estimativas geradas pelo Modelo 1 e pelo Modelo 2 para os períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março. O objetivo dessa abordagem foi visualizar espacialmente as variações na produtividade e analisar a precisão das estimativas geradas pelos modelos em diferentes cenários.

Posteriormente, foi realizada a interpolação dos dados de produtividade separadamente para cada talhão, utilizando o plug-in Smart-Map (Pereira et al., 2022). Como produto, foram gerados cinco mapas de estimativa de produtividade: (i) com os dados reais de produção obtidos em campo, (ii) com as estimativas do Modelo 1 para dezembro/janeiro, (iii) com as estimativas do Modelo 1 para fevereiro/março, (iv) com as estimativas do Modelo 2 para dezembro/janeiro e (v) com as estimativas do Modelo 2 para fevereiro/março. Esses mapas possibilitam a comparação entre os modelos e a identificação da metodologia mais precisa para a estimativa da produtividade do

cafeeiro, validando sua aplicação como ferramenta preditiva. Além disso, permitiu a identificação de áreas com maior e menor potencial produtivo, o que possibilitaria auxiliar o planejamento de manejos específicos e na otimização de recursos e intervenções conforme as necessidades de cada talhão e planta.

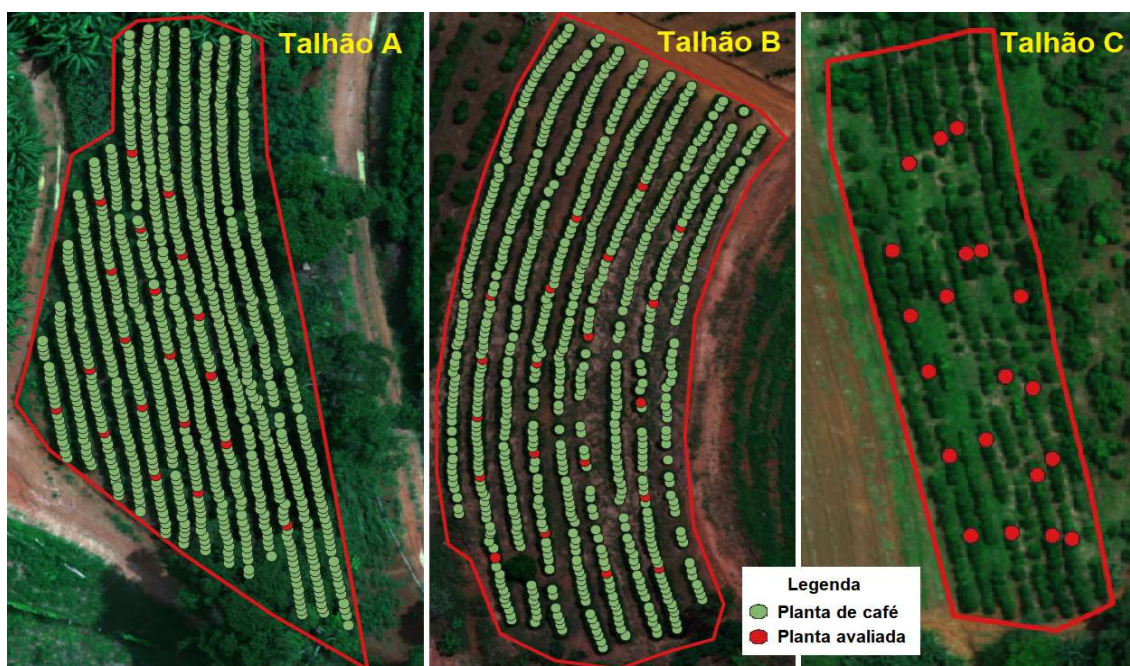
O método de interpolação utilizado foi a krigagem, e para cada talhão foram padronizados, para todos os modelos, os seguintes parâmetros: distância máxima, que define o raio de influência dos pontos vizinhos; lag (h), que controla a distância entre pares de pontos no semivariograma; modelo do semivariograma, que descreve a variação espacial dos dados; número de vizinhos considerados, que determina quantos pontos influenciam cada estimativa; e raio de busca, que limita a área de seleção dos pontos. A definição desses parâmetros para cada talhão foi baseada nos valores que geraram a melhor interpolação (maior R^2 do semivariograma) no mapa que utilizou a produtividade real obtida em campo. A padronização desses parâmetros foi importante para assegurar a consistência da análise e possibilitar comparações diretas entre os modelos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ortomosaico e georeferenciamento das plantas dos três talhões da área experimental

O primeiro resultado obtido no estudo foi o ortomosaico dos talhões, acompanhado do georeferenciamento de todas as plantas do talhão A e B e das plantas selecionadas do talhão C, no total 1796 plantas foram georeferenciadas (Figura 8). Na figura 8 é apresentada a imagem aérea dos talhões e a representação das plantas como pontos georeferenciados, destacando a localização precisa de cada uma. As 60 plantas selecionadas para avaliação (20 de cada talhão) estão evidenciadas por pontos vermelhos.

Figura 8 - Ortomosaico dos talhões de estudo com as plantas de café georreferenciadas



3.2 Atributos fenológicos das plantas utilizadas no desenvolvimento dos modelos de predição de produtividade

A avaliação dos atributos fenológicos (altura da planta, largura da copa ao longo da linha e média do número de frutos no 4º e 5º nó do ramo plagiotrópico) foi realizada nas 60 plantas selecionadas, em cada período, e os resultados estão ilustrados nos histogramas apresentados nas Figuras 9 a 13.

Por limitações técnicas, não foi possível obter uma imagem aérea no período de dezembro/janeiro. Consequentemente, o atributo fenológico de largura da copa ao longo da linha de café foi medido apenas uma vez, sendo esse valor adotado para os dois períodos de análise. Embora esta abordagem simplifique as variações sazonais, ela ainda permite uma avaliação consistente ao longo do tempo, considerando que a largura da copa tende a apresentar pouca variação em curtos intervalos de tempo ao longo de uma safra.

Figura 9 - Histograma da média de frutos por planta nos 4º e 5º nós durante o período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024

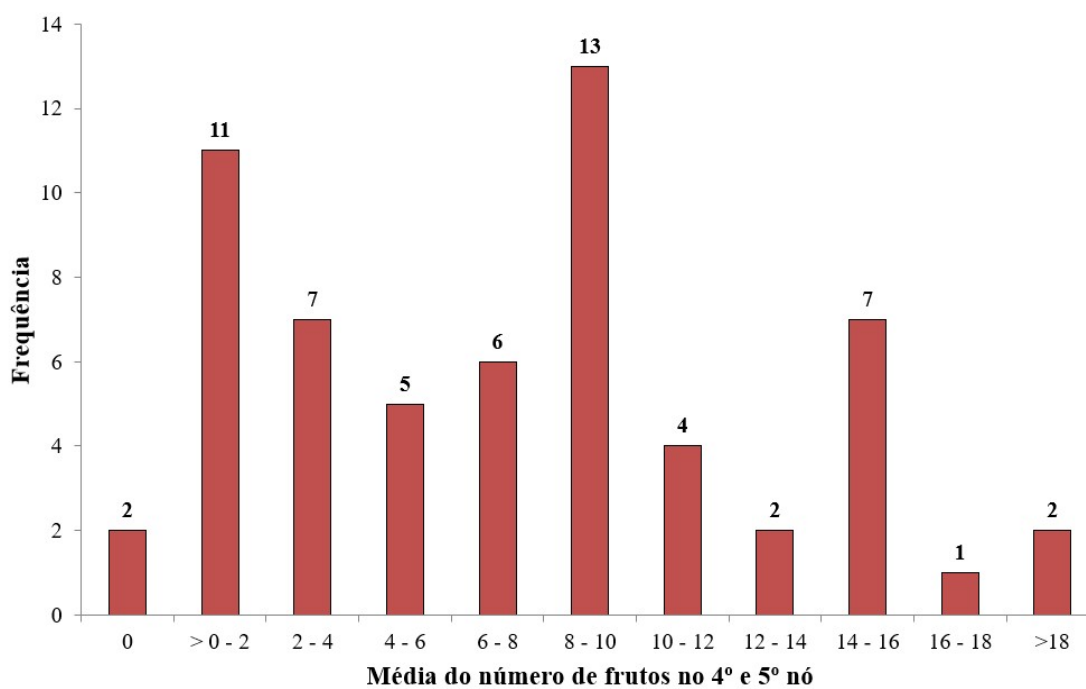


Figura 10 - Histograma da média de frutos por planta nos 4º e 5º nós durante o período de fevereiro a março de 2024

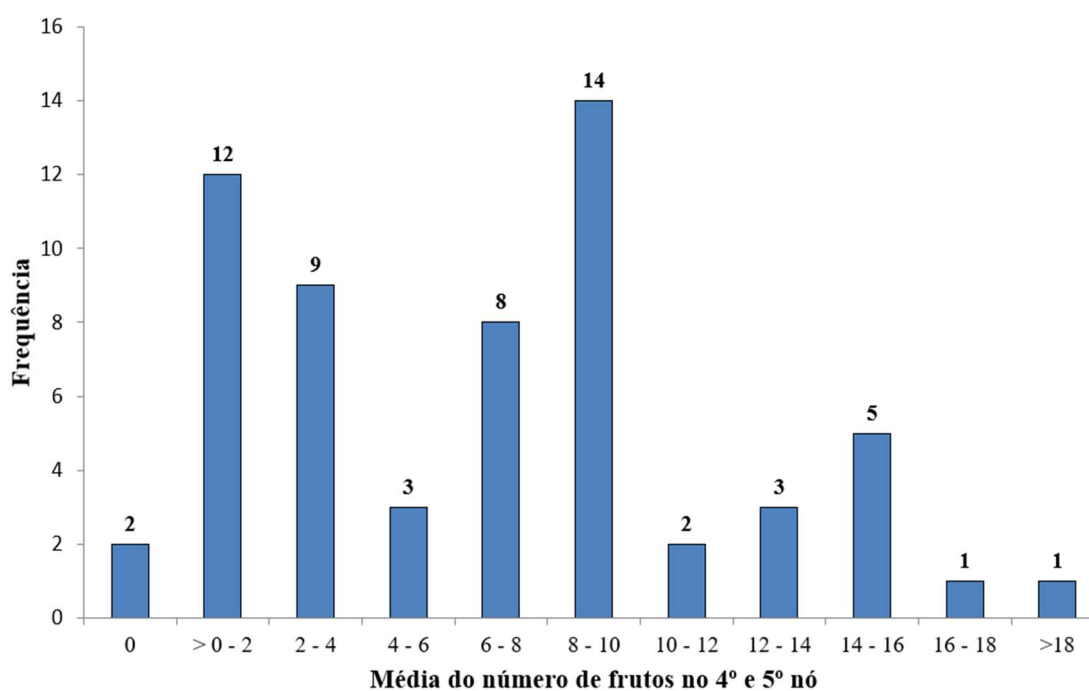


Figura 11 - Histograma da altura das plantas registrada durante o período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024

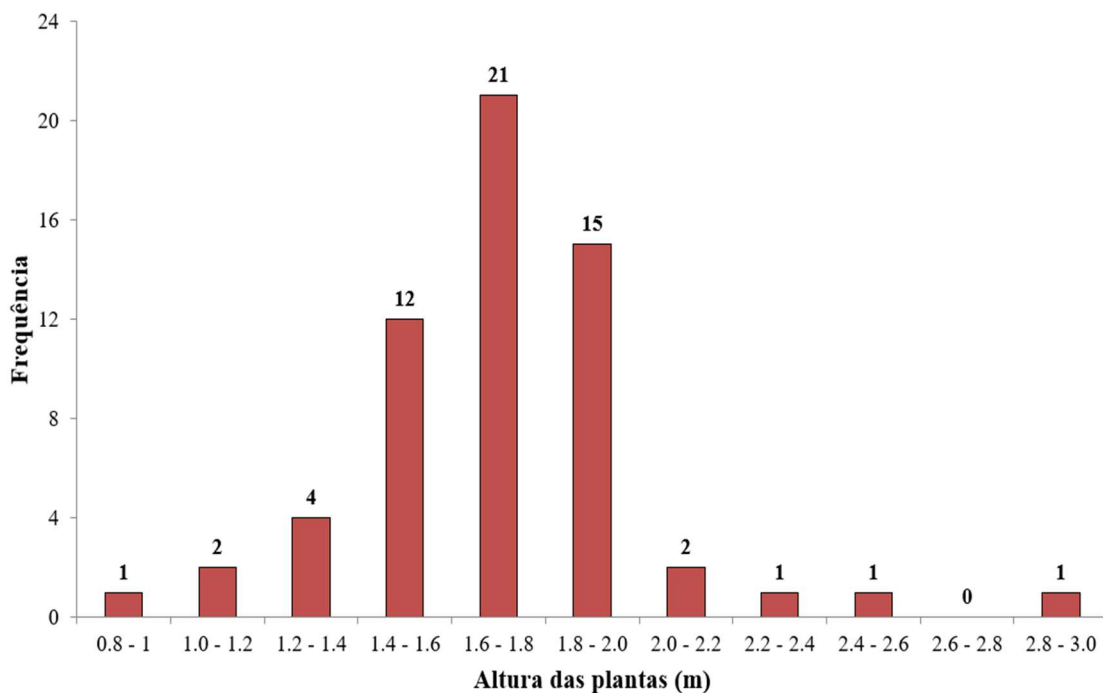


Figura 12 - Histograma da altura das plantas registrada durante o período de fevereiro a março de 2024

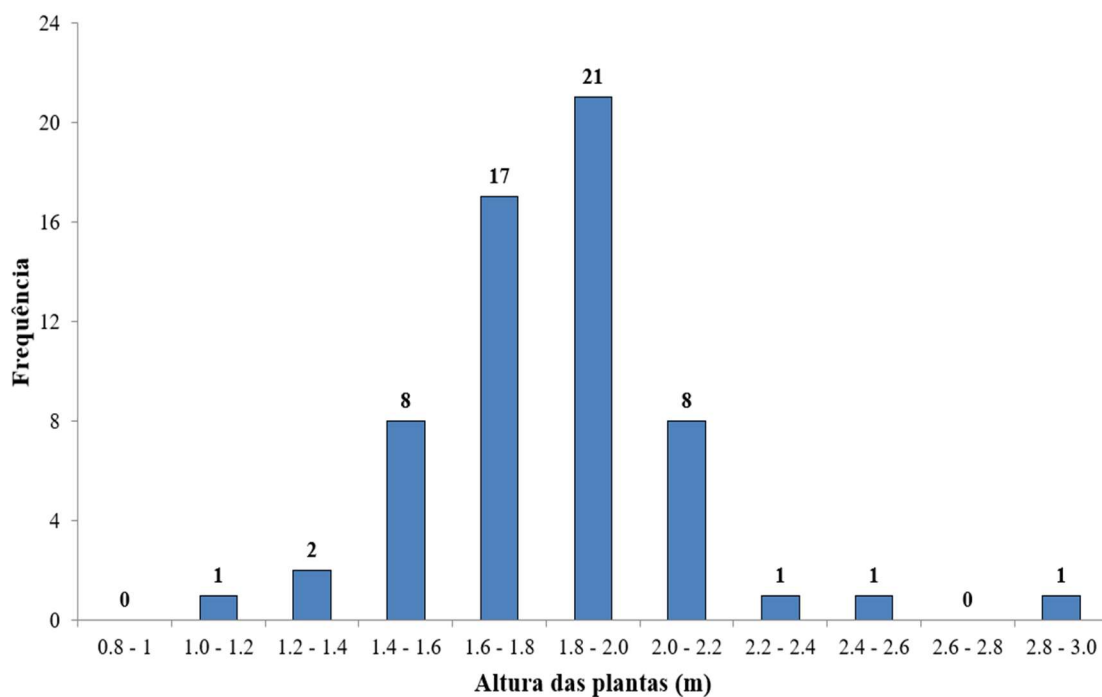
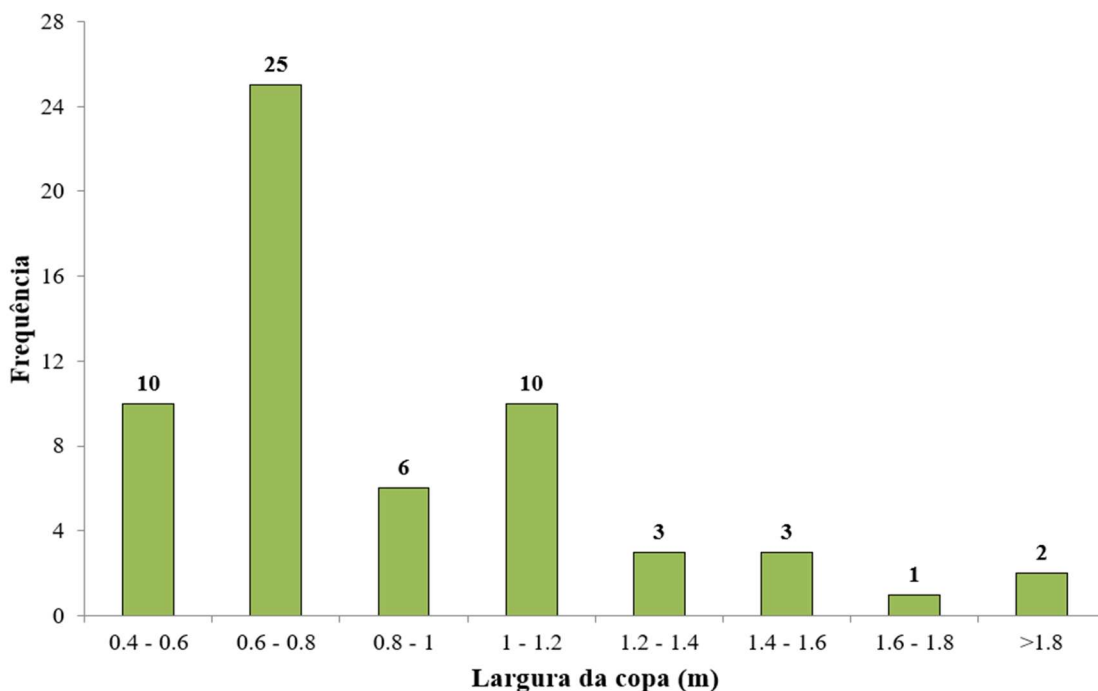


Figura 13 - Histograma da largura da copa das plantas avaliadas



Observa-se nos histogramas de média do número de frutos no 4º e 5º nó (Figura 9 e Figura 10) uma redução na quantidade de frutos entre o período de dezembro/janeiro e fevereiro/março, esse fato pode ser justificado pelo aborto natural de frutos, comum nessa fase fenológica do cafeeiro. O aborto de frutos geralmente ocorre em função de fatores como variações de temperatura, de disponibilidade hídrica, e até mesmo de processos fisiológicos internos da planta, que podem contribuir para uma menor retenção de frutos no período pós-florada. Tais fatores climáticos e fisiológicos impactam o desenvolvimento reprodutivo e podem ser intensificados por condições adversas, como déficits hídricos e estresse térmico, durante o crescimento do fruto (GASPARI-PEZZOPANE, et al., 2005).

Em relação aos atributos de altura e largura da copa, foram observadas variações nos valores obtidos (Figuras 11–13). No período de dezembro/janeiro, a faixa de altura mais frequente situa-se entre 1,6 e 1,8 metros, enquanto no período de fevereiro/março, esse intervalo se desloca para 1,8 a 2,0 metros. Já a largura da copa ocorre predominantemente entre 0,6 e 0,8 metros. Essas variações sugerem uma influência moderada de fatores como idade das plantas, manejo adotado e condições específicas de crescimento nos talhões.

3.3 Modelo automatizado de contagem de frutos do 1º ao 5º internódio produtivo dos ramos plagiotrópicos das plantas café

Além dos atributos fenológicos altura, largura e da contagem manual de frutos nos 4º e 5º nós, foi realizado também o registro fotográfico do 1º ao 5º internódio produtivo em 18 ramos plagiotrópicos de cada uma das 60 plantas avaliadas. No total, foram capturadas 1080 imagens em cada um dos dois períodos analisados, resultando em um conjunto total de 2160 imagens. Essas imagens serviram para o desenvolvimento do modelo automatizado de contagem de frutos e para a obtenção da média de frutos por planta nos internódios analisados. Os resultados obtidos durante a otimização dos hiperparâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Hiperparâmetros selecionadas para cada modelo de contagem automática de frutos do 1º ao 5º internódio produtivo

Período do modelo	Taxa de aprendizado	Tamanho do batch por iteração	Número máximo de iterações	Tamanho do batch por imagem na região de interesse (ROI)
dezembro/janeiro	0,00100	4	5000	256
fevereiro/março	0,00025	1	5000	256

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que os hiperparâmetros selecionados variaram entre os períodos analisados, refletindo diferenças no comportamento do modelo durante o treinamento para os dois conjuntos de dados. No período de dezembro/janeiro, a taxa de aprendizado de 0,001 associada a um tamanho de batch maior (4) proporcionou um bom equilíbrio entre velocidade de convergência e estabilidade do treinamento. Já no período de fevereiro/março, uma taxa de aprendizado menor (0,00025) e um tamanho de batch reduzido (1) foram necessários, sugerindo que os dados desse período possivelmente exigiram ajustes mais finos no aprendizado do modelo, possivelmente devido à maior complexidade ou variabilidade nas imagens anotadas. Apesar dessas diferenças, o número máximo de iterações (5000) e o tamanho do batch por imagem na ROI (256) foram mantidos constantes em ambos os períodos, demonstrando que essas configurações foram adequadas independentemente do conjunto de dados utilizado.

Os resultados da validação cruzada e do treinamento final do modelo para cada período estão apresentados na Tabela 3. Os valores demonstram um desempenho consistente do modelo em ambas as etapas e para ambos os períodos de coleta. Na validação cruzada, o modelo alcançou boas métricas de desempenho, evidenciando sua capacidade de generalização. Para o período de dezembro/janeiro, o AP foi de 81,61%, enquanto o F1-Score atingiu 88,63%. Já para o período de fevereiro/março, o modelo apresentou métricas ainda melhores, com AP de 87,47% e F1-Score de 92,43%. Esses valores refletem a eficácia do modelo em prever com precisão os dados de validação.

Tabela 3 - Resultado das métricas de desempenho da validação cruzada e do treinamento final do modelo para os períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março

Período do modelo	Etapa	AP (%)	AP50 (%)	AP75 (%)	F1-Score (%)
dezembro/janeiro	Validação Cruzada	81,61	97,02	92,55	88,63
	Treinamento Final	93,24	99,01	93,24	96,04
fevereiro/março	Validação Cruzada	87,47	97,99	96,10	92,43
	Treinamento Final	95,69	99,99	98,98	97,79

Nas etapas de treinamento final, conforme esperado, as métricas alcançaram valores significativamente mais altos devido ao cálculo ser realizado no próprio conjunto de treinamento. O modelo treinado para o período de dezembro/janeiro obteve um AP de 93,24% e F1-Score de 96,04%, enquanto o modelo de fevereiro/março apresentou AP de 95,69% e F1-Score de 97,79%. Esse melhor desempenho significa que o modelo com base no algoritmo Detectron-2 foi eficiente para identificar e contar os frutos de café na etapa de treinamento.

Os bons resultados obtidos na etapa de validação cruzada reforçam a robustez e a alta capacidade do modelo em lidar com os dados de maneira confiável. Com métricas consistentes em cenários de validação e no treinamento final, os modelos demonstraram eficácia tanto para identificar padrões nos dados quanto para fornecer resultados precisos. Essa combinação de desempenho destaca o potencial do modelo para aplicações futuras, mesmo em contextos desafiadores.

Figura 15 - Histograma da média de frutos do 1º ao 5º nó por planta durante o período de dezembro de 2023 a janeiro de 2024

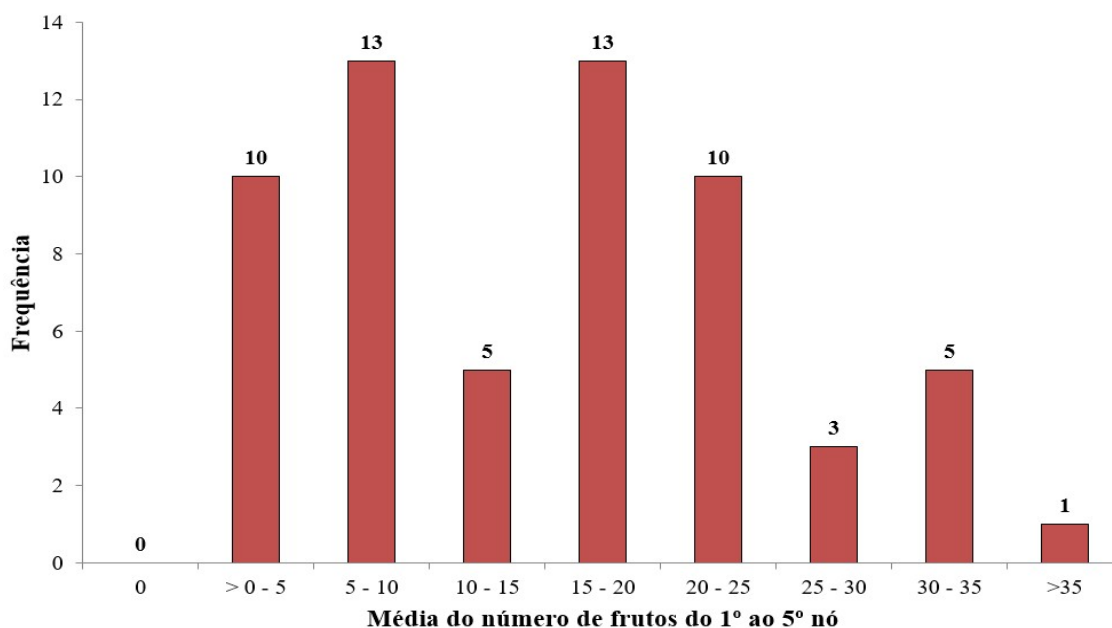
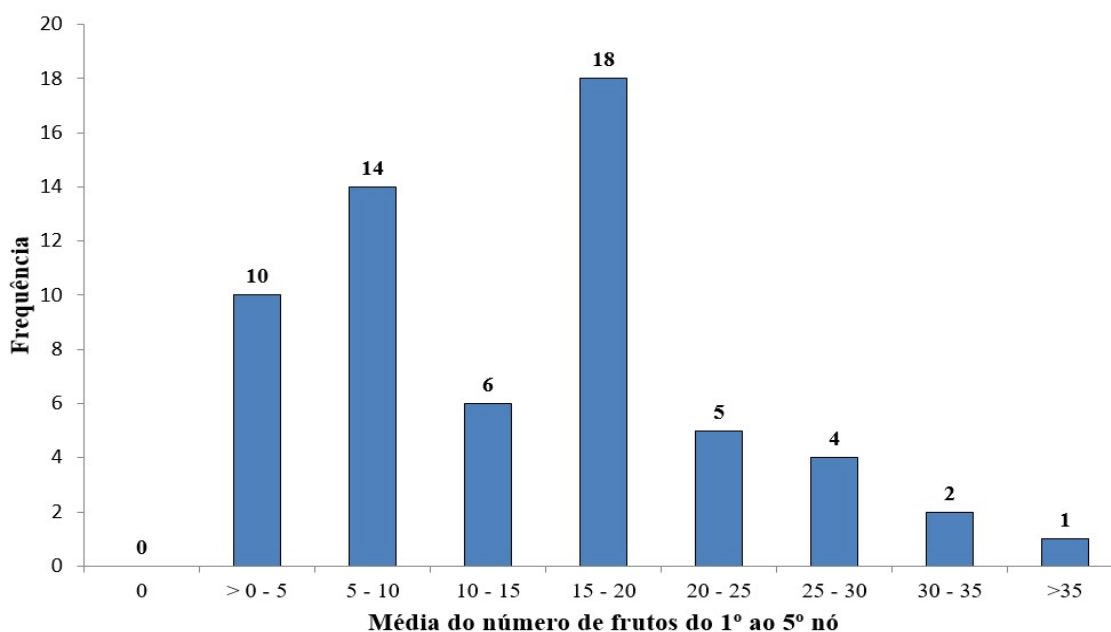


Figura 16 - Histograma da média de frutos do 1º ao 5º nó por planta durante o período de fevereiro a março de 2024



A análise dos histogramas das Figuras 15 e 16 revela uma redução na frequência de plantas com maior número de frutos no segundo período, possivelmente associada ao fenômeno de aborto natural dos frutos, já discutido anteriormente. As faixas de 5 a 10 e 15 a 20 frutos apresentaram as maiores frequências em ambos os

períodos, indicando um possível padrão na carga produtiva dos internódios analisados. Esse padrão pode refletir a capacidade reprodutiva média das plantas avaliadas, influenciada por fatores como genética, manejo e condições ambientais ao longo do ciclo produtivo.

3.4 Produtividade de café dos três talhões estudados

A colheita de café na região teve uma duração de aproximadamente três meses, com início em abril e término em junho. Na Figura 17 é apresentado o histograma de produção para as 1796 plantas avaliadas, enquanto na Figura 18 é apresentado o histograma específico de produção para as 60 plantas selecionadas

Figura 17 - Histograma de produção de todas as plantas dos talhões

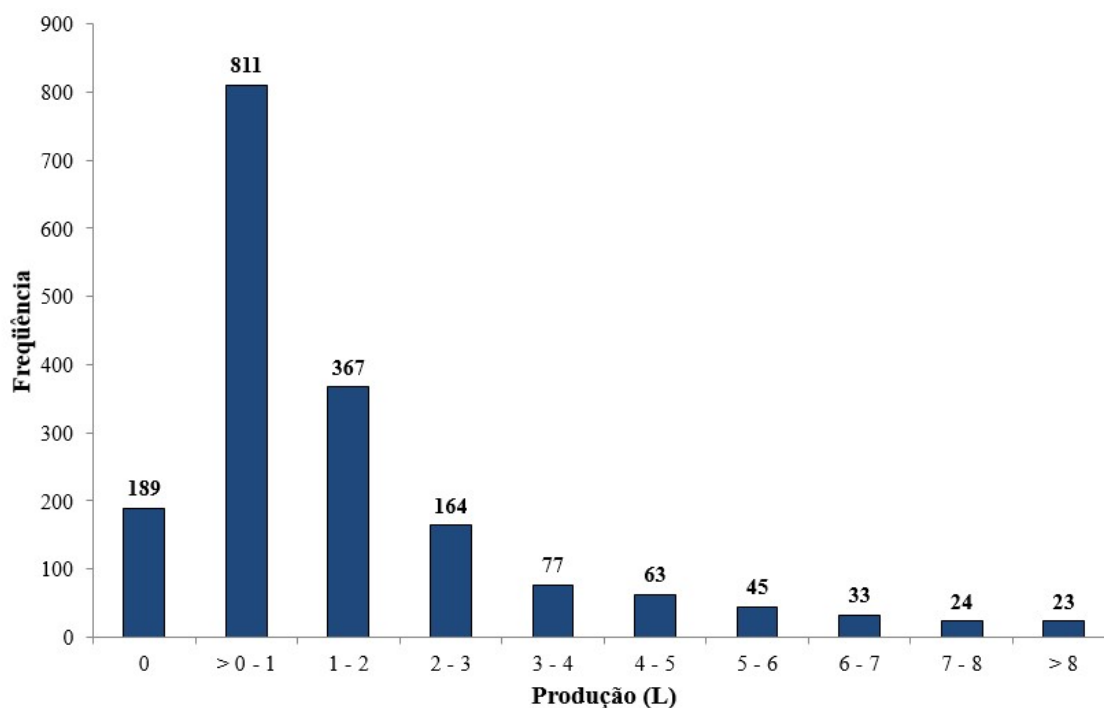
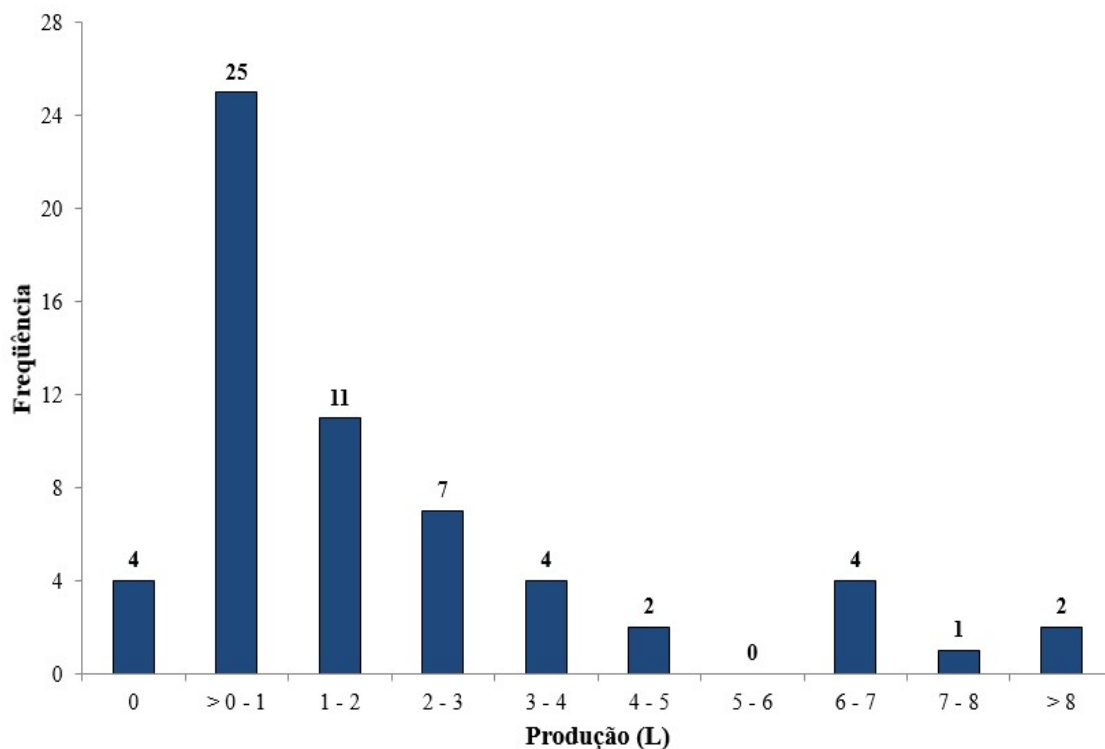


Figura 18 - Histograma de produção das plantas selecionadas para avaliação

Com os dois histogramas é possível fazer uma comparação direta entre a produção total e a amostra selecionada, facilitando a avaliação da representatividade das plantas escolhidas em relação ao conjunto geral avaliado. Visualmente, nota-se que a amostragem reflete bem o perfil produtivo total, visto que ambos os histogramas exibem uma distribuição similar. Essa semelhança sugere que a amostragem foi representativa e adequada para análises estatísticas, proporcionando uma visão da variabilidade produtiva do talhão.

Na Tabela 4 é apresentado um resumo dos dados coletados durante a colheita dos três talhões, destacando as informações mais relevantes para a análise da produtividade. Foi utilizado um fator de rendimento médio dos talhões de 480 litros de café, colhidos em campo, para produzir uma saca beneficiada, valores comumente praticados comercialmente na cafeicultura (ProCafé, 2019). Esses dados são essenciais para entender a relação entre a produção dos talhões e o rendimento final da colheita, permitindo uma análise mais precisa da produtividade.

Tabela 4 - Resumo da colheita nos talhões

Informação	Talhão A	Talhão B	Talhão C
Número de Plantas colhidas	996	780	800
Produção total de frutos (L)	1215,4	1440,9	1920
Média de produção por planta (L)	1,220	1,857	2,400
Produtividade de frutos (L/ha)	8681	8005	8727
Produção de café beneficiado kg – (sacas de 60kg)	151,9 (2,53)	180,1 (3,01)	240 (4,00)
Produtividade de café beneficiado (sacas/ha)	18,07	16,67	18,18

Os três talhões apresentaram produtividade inferior à média brasileira, que é de 30 sacas por hectare (CONAB, 2024). Esse desempenho pode ser explicado por fatores climáticos atípicos que afetaram a safra de 2024, como variações de temperatura e padrões de precipitação que não apenas influenciaram o crescimento das plantas, mas podem ter provocado estresses hídricos e térmicos, comprometendo o potencial produtivo das culturas (RAHN et al., 2014; FISCHERSWORRING et al., 2015). Essas condições adversas impactam diretamente a fisiologia da planta, levando a uma menor retenção de frutos e, conseqüentemente, a uma redução na produtividade.

3.5 Desenvolvimento dos modelos de estimativa de produtividade individual das plantas

3.5.1 Modelo 1 de estimativa de produtividade individual das plantas

Após a coleta de todos os dados, foi possível calcular IFPP1 para cada uma das 60 plantas selecionadas, conforme Equação 3. Esse índice foi determinado para dois períodos distintos de análise: dezembro/janeiro (Figura 19) e fevereiro/março (Figura 20). Inicialmente, as análises foram realizadas separadamente para cada talhão (A, B e C), levando em consideração a média do número de frutos do 4º e 5º nó de todos os 18 ramos plagiotrópicos analisados. O objetivo dessa etapa foi avaliar o desempenho geral do modelo em cada talhão individualmente. Os gráficos das

regressões apresentam as equações ajustadas (Figuras 19 e 20), juntamente com a linha de tendência.

Figura 19 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 1 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de dezembro/janeiro

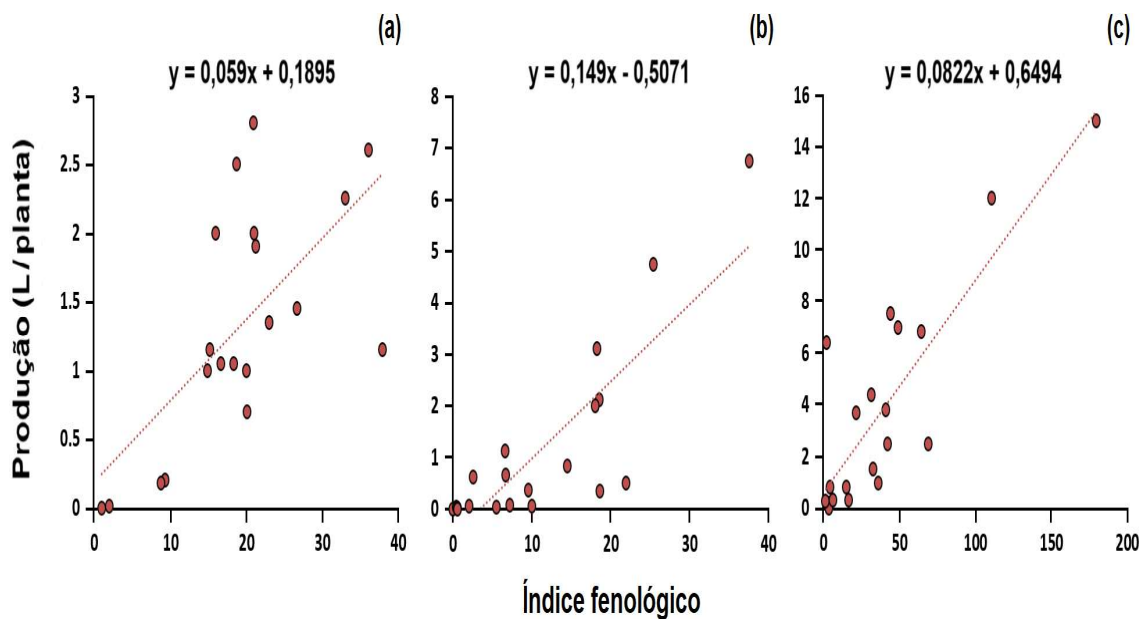
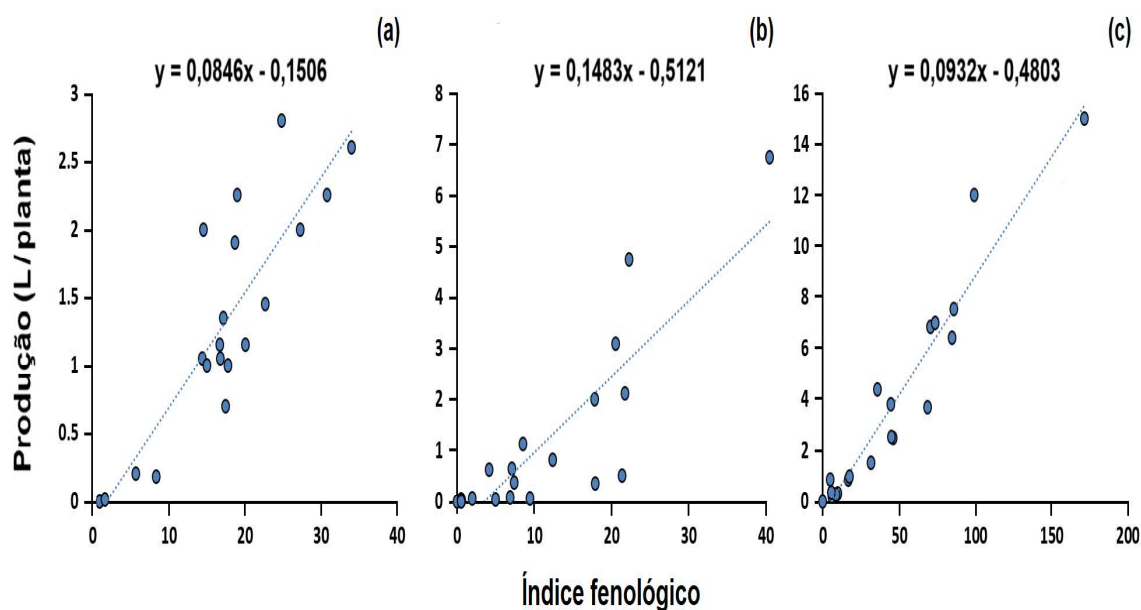
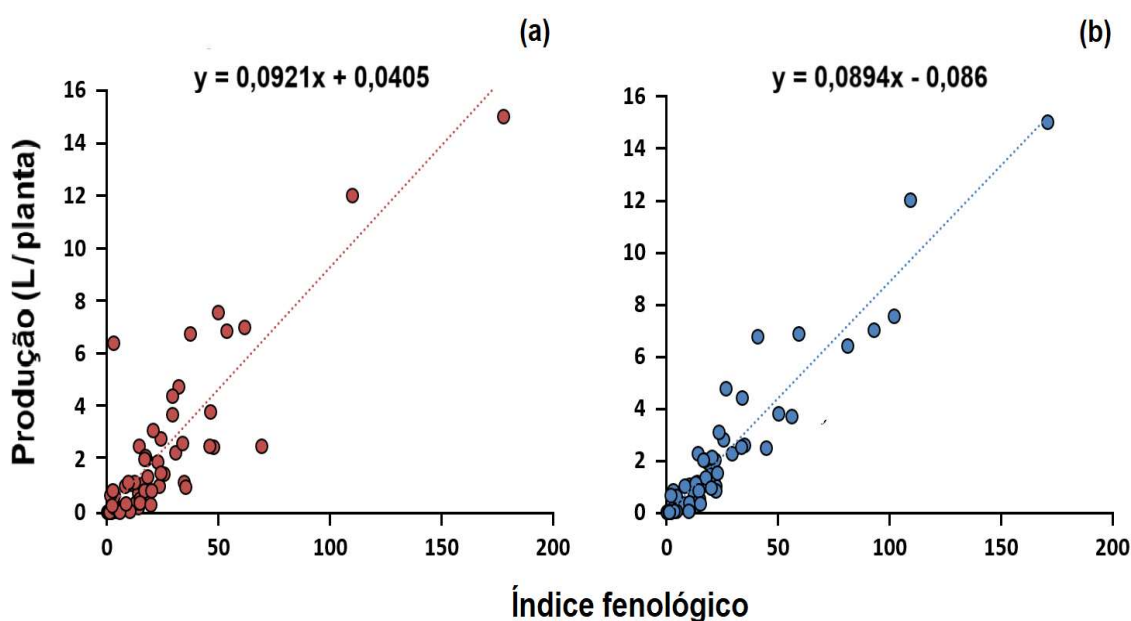


Figura 20 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 1 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de fevereiro/março



Posteriormente, foi realizada a análise considerando uma só equação para todas as plantas do talhão. O modelo final gerado estabeleceu a relação entre a produção individual de cada planta e o IFPP1 calculado, para ambos os períodos. Os resultados estão apresentados nos gráficos apresentados na Figura 21, que incluem as equações ajustadas, juntamente com a linha de tendência.

Figura 21 - Modelos finais de regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 1 e a produção por planta para todos os talhões, nos períodos de dezembro/janeiro (a) e fevereiro/março (b)



3.5.2 Modelo 2 de estimativa de produtividade individual das plantas

De forma análoga, foram realizadas as mesmas análises para o Modelo 2 de estimativa de produtividade individual das plantas. O IFPP2 foi calculado conforme Equação 4, para os períodos de análise de dezembro/janeiro (Figura 22) e fevereiro/março (Figura 23) e, em seguida, correlacionado com a produção individual de cada planta em cada um dos talhões (A, B e C).

Figura 22 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 2 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de dezembro/janeiro

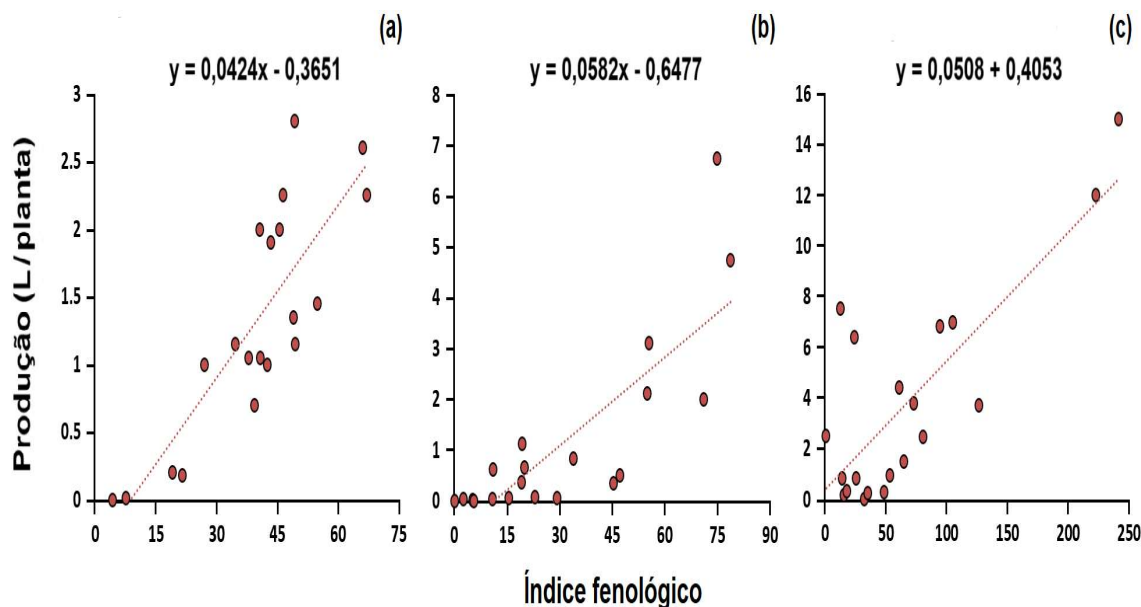
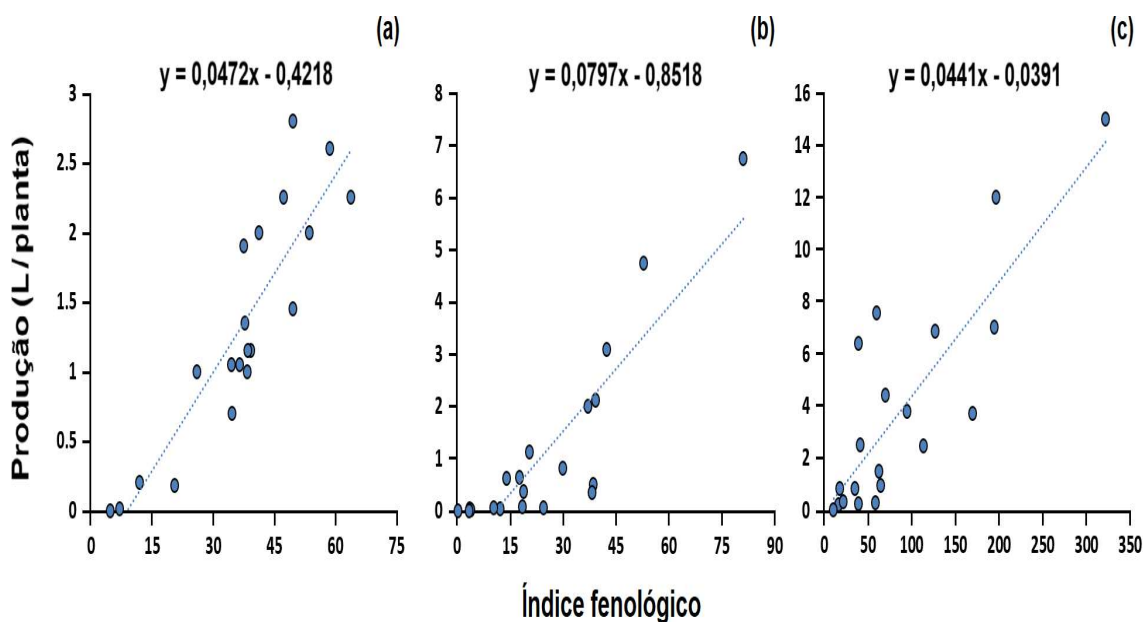


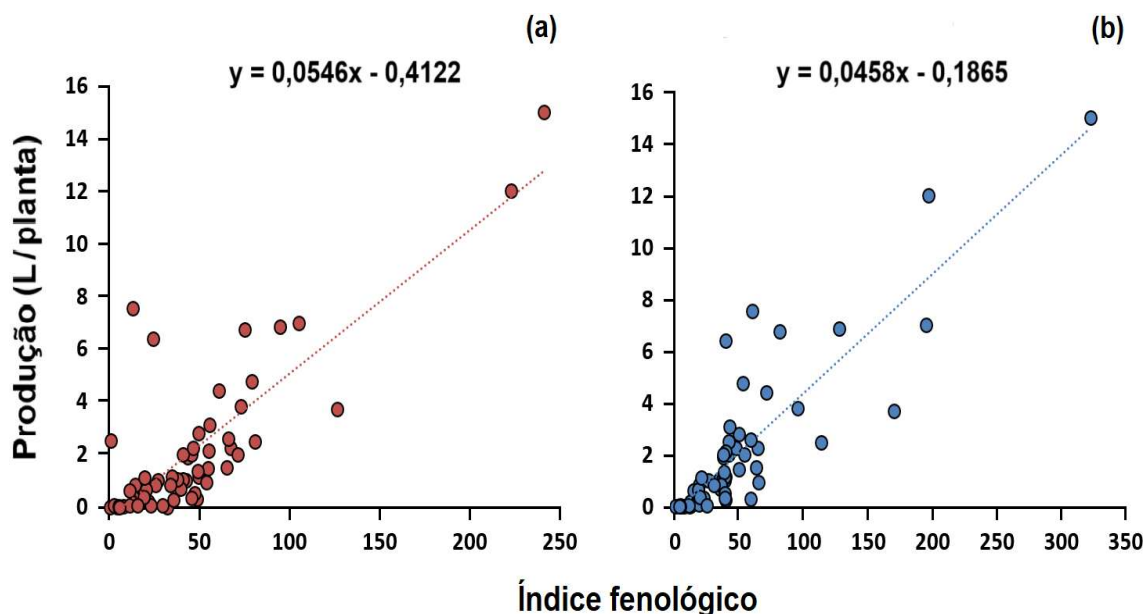
Figura 23 - Regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 2 e a produção por planta nos talhões A (a), B (b) e C (c) para o período de fevereiro/março



Também de forma análoga, foi realizada uma análise considerando uma única equação para todas as plantas do talhão. O modelo final gerado estabeleceu a relação entre a produção individual de cada planta e o IFPP2 calculado para ambos os

períodos. Os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir, que exibem as equações ajustadas juntamente com a linha de tendência (Figura 24).

Figura 24 - Modelos finais de regressão linear simples entre o índice fenológico de produtividade individual das plantas para o Modelo 2 e a produção por planta para todos os talhões, nos períodos de dezembro/janeiro (a) e fevereiro/março (b)



3.5.3 Métricas de desempenho dos modelos de estimativa de produtividade individual das plantas

A partir das regressões ajustadas, foram calculadas as métricas de desempenho dos modelos desenvolvidos para a estimativa da produtividade individual das plantas. Em todos os casos, a análise de variância (ANOVA) indicou que os modelos são estatisticamente significativos no nível de confiança de 95% (p -valor $< 0,05$), evidenciando que as variáveis independentes consideradas possuem influência na estimativa da produtividade.

As métricas consideradas para avaliação dos modelos foram: coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE). Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos para cada modelo (Modelo 1 e Modelo 2), nos diferentes períodos de análise (dezembro/janeiro e fevereiro/março) e para cada talhão individualmente (talhão A, B e C), além do modelo final, que abrange todas as plantas dos talhões avaliados. Esses resultados

possibilitam a comparação entre as abordagens utilizadas e fornecem *insights* sobre a precisão das estimativas de produtividade.

Tabela 5 - Métricas de desempenho dos modelos de estimativa de produtividade individual das plantas

Modelo	Período	Talhão	R ² (%)	RMSE (L / planta)	MAE (L / Planta)
Modelo 1	dezembro/janeiro	A	0,444	0,394	0,490
		B	0,699	0,934	0,763
		C	0,726	4,547	1,675
		Todos	0,731	2,234	1,011
	fevereiro/março	A	0,741	0,176	0,318
		B	0,733	0,828	0,689
		C	0,924	1,269	0,796
		Todos	0,889	0,923	0,635
Modelo 2	dezembro/janeiro	A	0,697	0,206	0,386
		B	0,657	1,065	0,764
		C	0,637	6,033	1,966
		Todos	0,682	0,434	0,535
	fevereiro/março	A	0,796	0,139	0,314
		B	0,776	0,697	0,653
		C	0,703	4,939	1,720
		Todos	0,747	0,374	0,460

No período de dezembro/janeiro, o Modelo 1 apresentou melhor coeficiente de determinação no talhão C, com R² de 0,726, embora com erros mais elevados (RMSE de 4,547 L/planta e MAE de 1,675 L/planta). Isso indica que, apesar de o modelo ter capturado bem a tendência de produtividade, houve maior variabilidade nas estimativas, resultando em menor precisão nas previsões individuais. Já para os talhões A e B, os resultados de R² foram menores (0,444 e 0,699), apesar de alcançarem menores valores de RMSE e MAE, indicando então que o modelo apresentou menor capacidade de capturar a tendência geral de produtividade nesses talhões, mas teve uma performance mais consistente nas estimativas individuais. O

modelo final para esse período, avaliando todas as plantas dos talhões, apresentou um valor de R^2 razoável (0,731), mas com erros elevados em comparação com os outros (RMSE de 2,234 L/planta e MAE de 1,011 L/planta), refletindo um bom ajuste geral da produtividade, porém com variações consideráveis nas previsões individuais.

No período de fevereiro/março, o Modelo 1 apresentou uma melhora significativa nos talhões A e B, com R^2 de 0,741 e 0,733, respectivamente, e menores erros absolutos. O talhão C, novamente, obteve o melhor coeficiente de determinação, alcançando o maior valor encontrado na tabela, com R^2 de 0,924. No entanto, apresentou também erros maiores, o que indica um bom ajuste global da produtividade, mas ainda com imprecisões nas estimativas individuais. De maneira geral, o Modelo 1 apresentou uma melhoria considerável em relação ao período anterior, com um desempenho bastante positivo quando aplicado a todos os talhões juntos (R^2 de 0,889, RMSE de 0,923 L/planta e MAE de 0,635).

Por sua vez, o Modelo 2, para o período de dezembro/janeiro, apresentou melhores resultados para o talhão A, com R^2 de 0,697 e erros significativamente menores (RMSE de 0,206 L/planta e MAE de 0,386 L/planta), indicando boa precisão nas estimativas. No entanto, para os talhões B e C, o desempenho foi inferior. Para o talhão B, obteve-se R^2 de 0,657 e RMSE de 1,065 L/planta, enquanto para o talhão C obteve-se R^2 de 0,637 e RMSE de 6,033 L/planta, ambos resultados indicando dificuldades na estimativa de produtividade nesses talhões. O modelo final para esse período, considerando todas as plantas dos talhões, apresentou um desempenho intermediário, com R^2 de 0,682 e RMSE de 0,434 L/planta, sugerindo um ajuste razoável da produtividade geral, mas com limitações na precisão das estimativas individuais.

No período de fevereiro/março, o Modelo 2 apresentou bons resultados. O talhão em que o modelo apresentou o melhor ajuste foi o A, com R^2 de 0,796 e baixos erros absolutos (RMSE de 0,139 L/planta e MAE de 0,314 L/planta), mantendo o desempenho satisfatório também para os talhões B e C. O resultado de maior destaque foi o modelo final para todos os talhões com R^2 de 0,747, RMSE de 0,374 L/planta e MAE de 0,460 L/planta, indicando um bom equilíbrio entre precisão e erros, ressaltando principalmente a diminuição dos valores de erro nas estimativas gerais.

Analisando somente os resultados dos períodos de coleta de dados da Tabela 5, observa-se que, de forma geral, os modelos ajustados para dezembro/janeiro apresentaram desempenho inferior quando comparados aos modelos do período de

fevereiro/março. Isso sugere que a variabilidade nas condições fenológicas ao longo dos dois períodos de análise influenciou o desempenho dos modelos. Essa influência se deve principalmente à variação no número médio de frutos nos ramos plagiotrópicos, que impacta diretamente os índices fenológicos, enquanto a altura da planta e a largura da copa apresentaram pouca variação entre os períodos. Como esperado, os modelos referentes ao período de fevereiro/março demonstraram uma performance superior, possivelmente devido à proximidade com o período de colheita, o que torna as informações coletadas nesse estágio mais consistentes e representativas do rendimento final da planta.

Essa proximidade com o período de colheita permite captar com maior precisão o número de frutos nos ramos que efetivamente completarão a maturação, o que impacta diretamente a acurácia da estimativa de produção. Em contraste, os dados do período de dezembro/janeiro, por estarem mais distantes da colheita, podem refletir uma maior influência de variações climáticas e fisiológicas temporárias, comprometendo a eficiência das previsões. Esses resultados destacam a relevância do momento de coleta de dados para o desempenho dos modelos preditivos na cafeicultura, e sugerem que ajustes sazonais podem aprimorar as estimativas em função das condições fenológicas das plantas.

De modo geral, o Modelo 2 se destacou especialmente no período de fevereiro/março, com melhor equilíbrio entre ajuste e precisão, resultando em menores erros absolutos na estimativa da produtividade. Além disso, sua aplicação se mostrou mais viável e eficiente, pois exigiu apenas o registro fotográfico dos ramos plagiotrópicos, permitindo a contagem automática dos frutos. Em contrapartida, o Modelo 1, embora tenha apresentado um bom ajuste da produtividade, demandou a contagem manual dos frutos nos internódios produtivos, tornando o processo mais trabalhoso e menos aplicável em larga escala. Dessa forma, os resultados indicam que o Modelo 2 tem maior potencial para ser utilizado operacionalmente, combinando precisão e praticidade na estimativa da produtividade do cafeeiro.

3.6 Mapeamento e estimativa espacial da produtividade do café com os modelos de predição individual das plantas

Por fim, foi realizada a análise geoespacial, que envolveu o mapeamento e a estimativa espacial da produtividade do café utilizando os modelos de predição

individual das plantas. Os parâmetros de interpolação adotados para cada talhão foram padronizados com base na configuração que proporcionou a melhor qualidade na interpolação do mapa de estimativa de produtividade gerado a partir dos dados reais coletados em campo. Esses parâmetros estão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros da interpolação definidos dos modelos de estimativa de produtividade de café para cada talhão

Talhão	Distância máxima (m)	Lag-h (m)	Modelo do semivariograma	Nº de vizinhos considerados	Raio de busca (m)
A	26,180	6,007	Linear	10	19,056
B	27,675	8,283	Linear	9	23,692
C	39,080	10,227	Linear	12	20,751

Em seguida, a partir das interpolações, foram gerados os mapas de estimativa de produtividade para cada talhão, considerando os dados de produção real obtidas em campo e das estimativas do Modelos 1 e 2 para os períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março (Figuras 25 – 27). A legenda foi padronizada em oito classes, estabelecidas com base nos valores mínimo e máximo estimados pelo modelo que considerou os dados de produção real, de modo a proporcionar a melhor visualização possível. Esses mapas permitem a comparação entre as estimativas dos modelos e os dados reais, possibilitando a avaliação da precisão das estimativas e a identificação de áreas com maior e menor potencial produtivo. Essa análise é fundamental para validar a aplicabilidade do modelo e aprimorar seu uso em futuras estimativas.

Figura 25 - Mapas de estimativa de produtividade do café para o Talhão A, com dados de produção real e estimativas dos Modelos 1 e 2 nos períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março

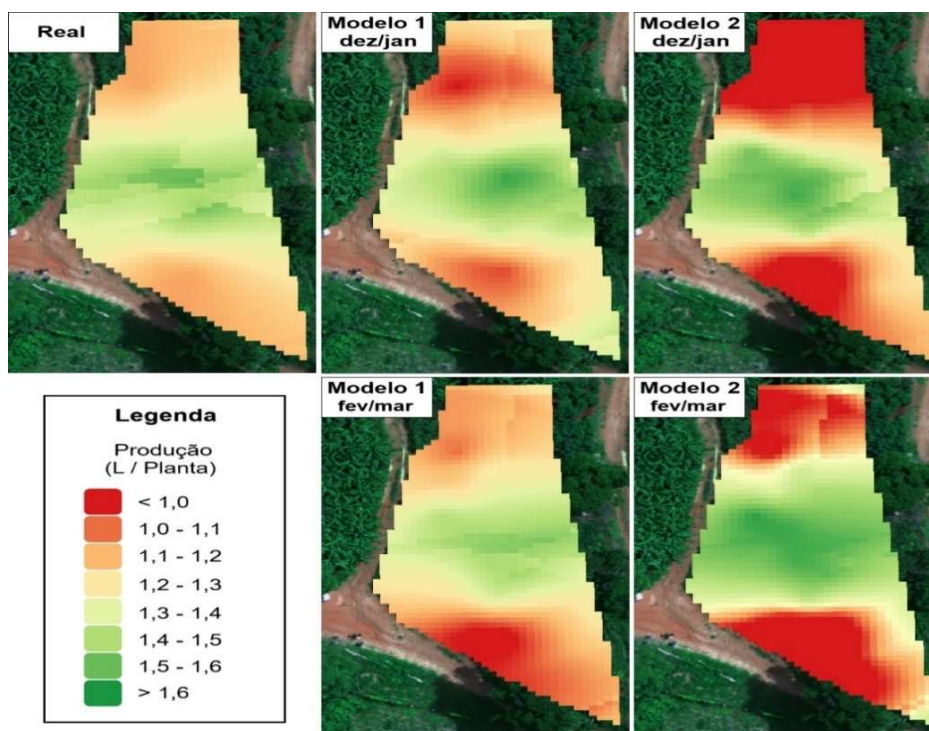


Figura 26 - Mapas de estimativa de produtividade do café para o Talhão B, com dados de produção real e estimativas dos Modelos 1 e 2 nos períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março

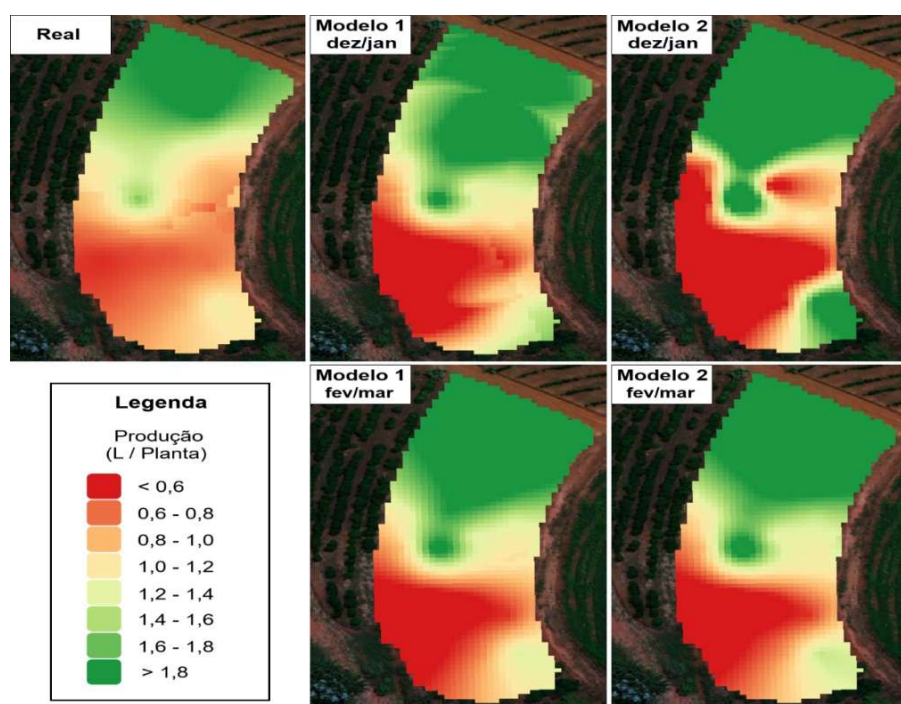
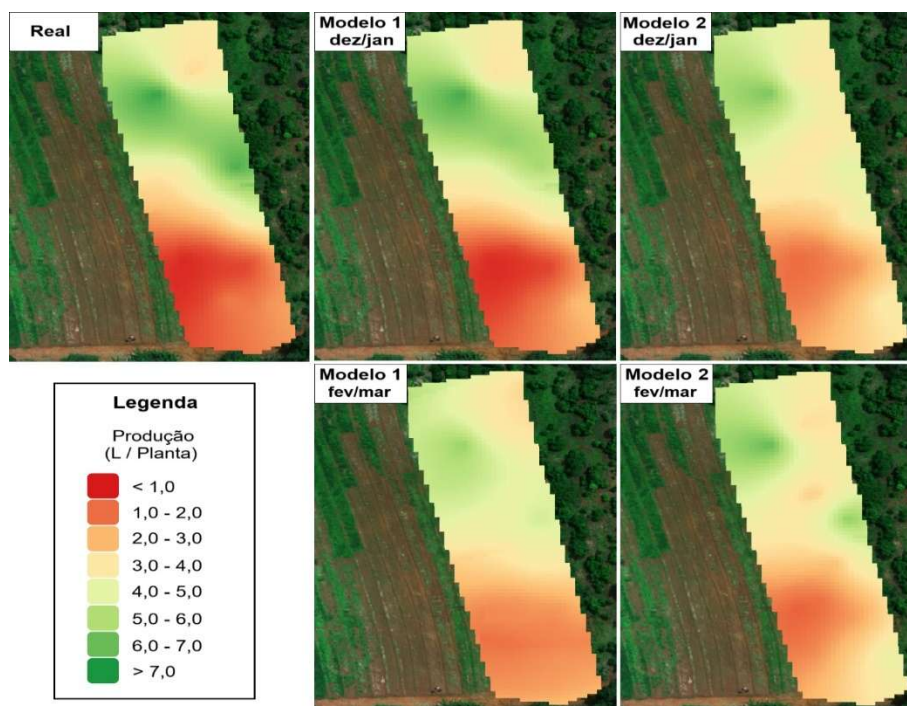


Figura 27 - Mapas de estimativa de produtividade do café para o Talhão C, com dados de produção real e estimativas dos Modelos 1 e 2 nos períodos de dezembro/janeiro e fevereiro/março



Para o talhão A (Figura 25), observa-se que o mapa obtido com base em dados de produção real apresentou uma tendência de maiores valores de produtividade na região central do talhão, enquanto as menores produtividades ocorreram nas extremidades superior e inferior. Essa distribuição foi corretamente captada pelos quatro modelos testados. O Modelo 1 se destacou por representar os valores de produção com maior precisão em ambos os períodos, evitando subestimações ou superestimações significativas. Em contrapartida, a análise visual da intensidade das cores nos mapas indica que o Modelo 2 superestimou os valores de produtividade nas regiões mais produtivas e subestimou nas menos produtivas. Isso resultou em estimativas mais imprecisas, sugerindo produtividades muito acima ou abaixo da realidade observada.

Para o talhão B (Figura 26), o mapa com base em dados de produção real evidencia uma clara tendência de divisão do talhão, com uma região superior mais produtiva e uma região inferior menos produtiva. Todos os modelos conseguiram captar essa tendência com sucesso. De modo geral, a análise da intensidade das cores nos mapas de todos os modelos revela, mais uma vez, o efeito de superestimação da produtividade nas áreas mais produtivas e subestimação nas

menos produtivas. Visualmente, todos os modelos apresentaram regiões de acertos e erros, sem que seja possível destacar algum deles como significativamente mais preciso na estimativa da produtividade.

Para o talhão C (Figura 27), o mapa com base em dados de produção real revela uma região inferior de baixa produtividade, com um aumento gradual até a região superior esquerda, enquanto a região superior direita mantém produtividades intermediárias. Essa tendência foi corretamente captada por todos os modelos. A análise visual dos mapas destaca o desempenho do Modelo 1 no período de dezembro/janeiro, que apresentou estimativas muito próximas às do modelo baseado em dados reais de produção. Os demais modelos conseguiram representar a tendência geral do talhão, porém subestimaram os valores de produtividade, como evidenciado pela menor intensidade das cores nos mapas.

A variabilidade espacial da produtividade do café apresentada nos mapas, pode ser atribuída a uma série de fatores, como diferenças na qualidade do solo, disponibilidade hídrica, topografia, práticas de manejo e até mesmo variáveis climáticas, como a incidência de geadas, chuvas e temperaturas extremas (SILVA et al., 2007). Essas variabilidades tornam cada área de cultivo única, exigindo abordagens diferenciadas de manejo para maximizar o rendimento de cada região dentro de um talhão. A identificação precisa dessas zonas produtivas e improdutivas é crucial para otimizar os usos de insumos, como a água e fertilizantes, além de reduzir os custos de produção e minimizar os impactos ambientais.

A implementação de modelos de estimativa de produtividade de café, como os propostos neste trabalho, constitui uma ferramenta valiosa tanto para produtores rurais quanto para pesquisadores. Os mapas gerados antes do período de colheita proporcionam uma visão geral da variabilidade espacial da produtividade nos talhões, identificando áreas com alto e baixo potencial produtivo. Essa abordagem oferece uma base importante para a tomada de decisões mais informadas sobre o manejo da cultura, especialmente quando aplicada ao longo de várias safras. Tal estratégia possibilita ajustes em tempo real e otimização da alocação de insumos e mão de obra, promovendo uma maior eficiência produtiva de forma sustentável.

Diante dos resultados apresentados, os índices fenológicos desenvolvidos (IFPP1 e IFPP2) mostraram-se eficazes para a estimativa da produtividade do café. A correlação observada entre os índices e a produção, bem como a relação espacial obtida, corroboram essa afirmação. É possível concluir que esses índices podem

integrar dados ao planejamento agrícola, possibilitando não apenas a previsão de áreas de alta ou baixa produtividade, mas também o ajuste de práticas de manejo antes mesmo da colheita, conforme as necessidades específicas de cada região do talhão. Isso contribui para o equilíbrio nutricional das plantas e a mitigação de estresses, impactando positivamente tanto a safra atual quanto a produtividade das safras seguintes. Além disso, essas análises abrem possibilidades para a implementação de tecnologias de agricultura de precisão, como a aplicação variável de insumos e a definição de zonas de manejo, impulsionando o avanço tecnológico e sustentável da cafeicultura no mundo.

Embora os resultados obtidos sejam promissores, é importante destacar a necessidade de validações adicionais para fortalecer a confiança nos modelos propostos. Este estudo serve como uma etapa inicial para o desenvolvimento de índices fenológicos aplicados à previsão de produtividade do café a nível de planta. Para garantir sua efetividade, é essencial a realização de experimentos em várias safras e em diferentes regiões, além de avaliar a robustez dos modelos sob diversas condições ambientais. Acredita-se ainda que a inclusão de outras variáveis agronômicas e de manejo aos modelos poderá também contribuir para uma maior precisão. Assim, novos estudos serão necessários para aprimorar ainda mais o uso desses índices fenológicos como ferramentas de estimativa de produtividade do café.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que ambos os modelos apresentaram desempenho satisfatório na estimativa de produtividade do cafeeiro em nível de planta, especialmente no período fevereiro/março, com R^2 relevantes e erros reduzidos. No entanto, o Modelo 2 se destacou por apresentar menores valores de erro (RMSE de 0,374 L/planta e MAE de 0,460 L/planta) e maior eficiência prática, uma vez que, em vez de exigir a contagem manual dos frutos, utilizou apenas o registro fotográfico dos ramos plagiotrópicos, permitindo a contagem automática dos frutos. Assim, o Modelo 2 se mostrou a opção mais precisa e viável para a estimativa de produtividade do café. Os resultados também destacam o potencial dos índices fenológicos como indicadores confiáveis para a estimativa da produtividade, com ampla aplicabilidade no planejamento agrícola e no ajuste das práticas de manejo. A continuidade no desenvolvimento desses modelos é essencial para aprimorar ainda

mais sua precisão e consolidá-los como ferramentas estratégicas para otimizar a produtividade na cafeicultura, promovendo a sustentabilidade e a competitividade do setor.

5 REFERÊNCIAS

ALFONSI, E. L. **Uso de índices fenológicos em modelos de previsão de produtividade do cafeeiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 104p. Tese Doutorado.

CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J., ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R.; PINTO H.S. **Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro**. Ecosistema, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, p. 166-171, 1984.

CAMARGO, M.B.P.; SANTOS, M.A.; PEDRO JUNIOR, M.J.; FAHL, J.I.; BRUNINI, O.; MEIRELIS, E.J.L.; BARDIN, L. **Modelo agrometeorológico de monitoramento e de estimativa de quebra de produtividade como subsídio à previsão de safra de café (Coffea arabica L.): resultados preliminares**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3, 2003, Porto Seguro - BA. Anais... Brasília: Embrapa Café, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Clima mais favorável e bienalidade positiva apontam produção estimada em 58,08 milhões de sacas de café**. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5362-clima-mais-favoravel-e-bienalidade-positiva-apontam-producao-estimada-em-58-08-milhoes-de-sacas-de-cafe> Acesso em: 15 nov. 2024.

COSTA, L.C. Modelagem e simulação em agrometeorologia para se estabelecer um programa amplo de reorganização da cafeicultura In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1997, Piracicaba-SP. Suplemento dos anais; mesas-redondas. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 3-6.

DAMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. D. C. **Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review**. J. Agric. Food Chem, v.66, n. 21, p. 5264-5274, 2018.

DJI. **Soluções de drones e sensores para agricultura de precisão**. 2024. Disponível em: <https://www.dji.com>. Acesso em: 16 nov. 2024.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: Wiley, p. 709, 1981.

ERON, Francisco et al. **Computer vision-aided intelligent monitoring of coffee: Towards sustainable coffee production**. *Scientia Horticulturae*, v. 327, p. 112847, 2024.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; ALFONSI, E. L.; CAMARGO, M. B. P. **Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estimativa da produtividade do cafeeiro, utilizando as características fenológicas determinantes do crescimento e produção**. In: Simpósio de pesquisas dos cafés do Brasil, 4. 2005, Londrina. Anais...Brasília, 2005.

FISCHERSWORRING, B.; SCHMIDT, G.; LINNE, K.; PRINGLE, P. **Adaptação às mudanças climáticas na produção de café: um guia passo a passo para dar suporte aos cafeicultores na adaptação às mudanças climáticas**. Versão de janeiro de 2015. Hamburgo: Iniciativa Café & Clima, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Coffee**. 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/coffee/en/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

GASPARI-PEZZOPANE, C. D.; MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R.; SIQUEIRA, W. J.; AMBRÓSIO, L. A.; MAZZAFERA, P. **Influências ambientais no rendimento intrínseco do café**. *Bragantia*, v. 64, p. 39-50, 2005.

HOFFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Springer Science & Business Media, 2007.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION (ICO). **World Coffee Statistics Database**. 2024. Disponível em: <https://ico.org/what-we-do/world-coffee-statistics-database/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

LIU, W.T.H.; LIU, B.W.Y. **Comparação de três modelos de previsão da safra de café no Estado de Minas Gerais. Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 40, n. 8, p.801-807, 1988.

MICASENSE. **Tecnologia de sensores multiespectrais para monitoramento agrícola. 2024**. Disponível em: <https://www.micasense.com>. Acesso em: 16 nov. 2024.

MIRANDA, J. M.; REINATO, R.; SILVA, A. B. **Modelo matemático para previsão da produtividade do cafeeiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, p. 353-361, 2014.

OLIVEIRA, D. A. **Estimativa da produção de café por meio de índice fenológico. Lavras**. UFLA, 2007. 20p. Dissertação Mestrado.

Pereira, G. W.; Valente, D. S. M.; Queiroz, D. M.; Coelho, A. L. F.; Costa, M. M.; Grift, T. **Smart-map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging**. Agronomy, 12(6), 1350. 2022.

PEREIRA, S. P. et al. **Crescimento, produtividade e bienalidade do cafeeiro em função do espaçamento de cultivo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 46, p. 152-160, 2011.

PICINI, A.G.; CAMARGO, M.B.P., ORTOLANI, A. A.; FAZUOLI, L.C.; GALLO, P.B. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro**. Bragantia, Campinas, v. 58, n.1,p. 157-170, 1999.

PIX4D SA. Pix4Dmapper (versão 4.9.0) [software]. Lausanne: Pix4D SA, 2023. Disponível em: <https://www.pix4d.com/download-software>. Acesso em: 20 nov. 2024.

POWERS, David MW. **Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation**. arXiv preprint arXiv:2010.16061, 2020.

PROCAFÉ. **Fundação orienta sobre ajuste de rendimento em cafés colhidos em diferentes estágios de maturação**. 2019. Disponível em:

<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/cafe/245426-procafe-fundacao-orienta-sobre-ajuste-de-rendimento-em-cafes-colhidos-em-diferentes-estagios-de-maturacao.html>. Acesso em: 15 nov. 2024.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.16. Open Source Geospatial Foundation Project, 2020.

QIAO, Y.; VALENTE, J.; SU, D.; ZHANG, Z.; HE, D. **AI, sensors and robotics in plant phenotyping and precision agriculture**. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, 2022.

QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; PINTO, F. A. C. **Agricultura digital**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

RAHN, E.; LADERACH, P.; BACA, M.; CRESSY, C.; SCHROTH, G.; MALIN, D. **Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: where are the synergies?**. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 19, p. 1119-1137, 2014.

REIS, A.S. **Zoneamento agroclimático para cafeicultura em Pernambuco**. Recife, IPA, 1972. 24p. (Boletim técnico, 52).

SANOU, J.; TENGBERG, A.; BAZIÉ, H.R.; MINGASSON, D.; OSTWALD, M. **Assessing Trade-Offs between Agricultural Productivity and Ecosystem Functions: A Review of Science-Based Tools**. *Land*, v. 12, n. 7, p. 1329, 2023.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do Estado de São Paulo. *Bragantia*, v. 65, p. 173-183, 2006.

SILVA, F. M. da; MORAES, M. H. de; OLIVEIRA, R. B. de; SILVA, C. A. da. **Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café**. *Ciência Rural*, v. 37, n. 2, p. 391-397, 2007.

SILVA, H. LAINS. **Contribuição para o estudo das causas de variação anual de produção de café**. *Revista do Café Português*, Lisboa, V.3, n. 10, p. 13-28, 1956.

TOPCON POSITIONING SYSTEMS. **Topcon Tools: software for GNSS and surveying data management**. Versão 8.2.3 Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, 2023.

TOPOMAP. **GNSS RTK T10**. Disponível em: <https://topomap.com.br/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TOSELO, R.N.; ARRUDA, H.V. **Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica, no Estado de São Paulo**. Bragantia, Campinas, v. 21, p. 449-465, 1962.

WU, Yuxin; KIRILLOV, Alexander; MASSA, Francisco; LO, Wan-Yen; GIRSHICK, Ross. **Detectron2**. 2019. Disponível em: <https://detectron2.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 28 dez. 2024.

ZAIDI, S. S. A.; ANSARI, M. S.; ASLAM, A.; KANWAL, N.; ASGHAR, M.; LEE, B. **A survey of modern deep learning based object detection models**. Digital Signal Processing, v. 126, p. 103514, 2022.