

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA

BACHARELADO EM AGRONOMIA

Nagíbio José Paranhos

**ANÁLISE DA RELAÇÃO DINÂMICA ENTRE ÍNDICES ESPECTRAIS E A  
PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO PÓS-PODA.**

São João Evangelista – MG  
2025

NAGÍBIO JOSÉ PARANHOS

**ANÁLISE DA RELAÇÃO DINÂMICA ENTRE ÍNDICES ESPECTRAIS E A  
PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO PÓS-PODA.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.

---

P223a Paranhos, Nagíbio José.

Análise da relação dinâmica entre índices espectrais e a produtividade do cafeeiro pós-poda/ Nagíbio José Paranhos – 2025.

34f.: il.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2025.

1. Coffea arábica. 2.Recepa. 3.Landsat. I. Paranhos, Nagíbio José.  
II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 633.7

---

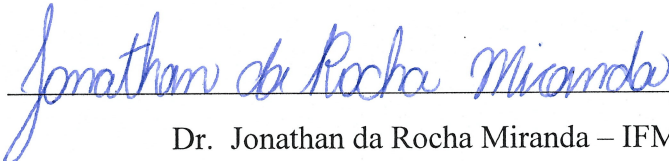
Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/43

Nagíbio José Paranhos


**ANÁLISE DA RELAÇÃO DINÂMICA ENTRE ÍNDICES ESPECTRAIS E A  
PRODUTIVIDADE DO CAFEIRO PÓS-PODA.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

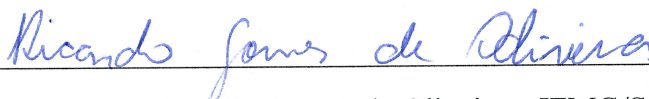
Aprovado em: 15/08/2025 pela banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_

Dr. Jonathan da Rocha Miranda – IFMG/SJE

  
\_\_\_\_\_

Dr. Alisson Eufrásio José de Carvalho – IFMG/SJE

  
\_\_\_\_\_

Me. Ricardo Gomes de Oliveira – IFMG/SJE

Dedico este trabalho aos meus pais,  
que sob muito sol, fizeram-me chegar  
até aqui, na sombra.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para vencer os desafios ao longo desta caminhada.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante, que sempre foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Guardo também em minha memória e em meu coração a presença das minhas queridas avós, Expedita Ferreira da Silva (in memoriam) e Maria Conceição Santos (in memoriam). Embora não estejam mais fisicamente comigo, deixaram-me exemplos de dedicação, fé, coragem e amor, que permanecem como inspiração diária em minha vida.

Ao meu orientador, professor Jonathan da Rocha Miranda, pela orientação, paciência, disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos, que foram essenciais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Aos demais professores, pela dedicação e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do curso. Aos colegas de curso e amigos, pela parceria, pelas trocas de experiências e pelo apoio durante essa jornada acadêmica.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, deixo registrado o meu mais sincero agradecimento.

## RESUMO

O estudo monitorou dez talhões utilizando uma série temporal de produtividade (2012–2024) e imagens anuais do satélite Landsat 8. Por meio da plataforma *Google Earth Engine*, foram calculados os índices NDVI, SAVI e NDWI a partir do pixel central de cada talhão, correlacionando-os com os dados de safra. Os resultados indicam que a recepa intensificou e inverteu o ciclo de bienalidade produtiva da lavoura. Uma queda abrupta nos índices espectrais foi observada no ano anterior à poda, demonstrando potencial preditivo para o manejo. A recuperação vegetativa, mensurada pelos índices, atingiu seu pico em 2020, com a maioria dos talhões exibindo uma defasagem de um ano entre o máximo vigor vegetativo e o pico de produção. Os modelos de regressão múltipla apresentaram alto poder explicativo ( $R^2 > 0,80$ ) apenas nos anos de maior heterogeneidade entre talhões (2018–2020), período correspondente à recuperação pós-poda. Contudo, a forte colinearidade entre os índices e a pequena amostragem limitou a robustez estatística. Foi possível observar que a relação entre a resposta espectral e a produtividade do café é dinâmica e sensível às intervenções de manejo e à fisiologia da planta. Isso invalida a hipótese de um modelo de regressão universal e estável para a estimativa de safra em diferentes fases do ciclo cafeeiro, destacando que a aplicabilidade do sensoriamento remoto para esse fim depende do contexto fenológico da cultura.

**Palavras-chave:** *Coffea arábica*. Recepa. Landsat.

## ABSTRACT

The study monitored ten plots using a productivity time series (2012–2024) and annual images from the Landsat 8 satellite. Through the Google Earth Engine platform, the NDVI, SAVI, and NDWI indices were calculated from the central pixel of each plot and correlated with yield data. The results indicate that the *recepa* pruning intensified and inverted the crop's biennial bearing cycle. An abrupt drop in spectral indices was observed in the year prior to pruning, demonstrating predictive potential for management. The vegetative recovery, measured by the indices, peaked in 2020, with most plots exhibiting a one-year lag between maximum vegetative vigor and peak production. The multiple regression models showed high explanatory power ( $R^2 > 0.80$ ) only during the years of greatest heterogeneity between plots (2018–2020), the period corresponding to post-pruning recovery. However, strong collinearity between the indices and the small sample size limited statistical robustness. It was observed that the relationship between the spectral response and coffee productivity is dynamic and sensitive to management interventions and the plant's physiology. This invalidates the hypothesis of a universal and stable regression model for yield estimation in different phases of the coffee cycle, highlighting that the applicability of remote sensing for this purpose depends on the crop's phenological context.

**Keywords:** *Coffea arabica*. Recepa. Landsat.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Importância econômica.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Relevância da estimativa de safra para o setor cafeeiro .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Uso de dados espectrais na estimativa de safra de café.....</b>	<b>12</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Local do experimento .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. Procedimento de receita .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3. Descrição dos talhões.....</b>	<b>14</b>
<b>3.4. Aquisição do banco de dados.....</b>	<b>15</b>
<b>3.5. Etapa de processamento dos dados.....</b>	<b>17</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O café (*Coffea* spp.) é uma das commodities agrícolas mais relevantes do mundo, tanto em valor econômico quanto em impacto social. O Brasil ocupa posição de destaque como maior produtor e exportador global, sendo responsável por mais de um terço da produção mundial (FREITAS et al., 2024). Dentro do território brasileiro, o estado de Minas Gerais desempenha papel central: além de deter o maior parque cafeeiro do país, é responsável por cerca de 70% da produção nacional de café arábica, com área cultivada superior a um milhão de hectares distribuída por aproximadamente 500 municípios (CONAB, 2024; VALVERDE, 2024). A cultura do café arábica sustenta economias regionais, movimenta a balança comercial e emprega milhares de trabalhadores, sendo considerada um dos alicerces do agronegócio mineiro (XAVIER et al., 2022).

Em função dessa relevância, a estimativa de safra constitui atividade estratégica para produtores, agentes de mercado e instituições públicas. Previsões antecipadas permitem o planejamento de insumos, logística de colheita e comercialização, bem como a formulação de políticas públicas de apoio ao setor. Além disso, o café é negociado em bolsas internacionais, e oscilações de oferta influenciam diretamente os preços (PEREIRA et al., 2017). No entanto, estimar com precisão a produtividade do cafeeiro é uma tarefa complexa, devido à interação de múltiplos fatores: variabilidade genética e fenológica, diferenças edafoclimáticas, nível de manejo e, especialmente, a bionalidade produtiva, que alterna anos de alta e baixa carga frutífera (SANTOS; CAMARGO, 2006 apud PEREIRA et al., 2017).

Nos últimos anos, o sensoriamento remoto orbital tem se consolidado como ferramenta promissora para a agricultura de precisão, oferecendo novas possibilidades para o monitoramento da cultura do café e a estimativa de safra. Por meio da análise de índices espectrais derivados de imagens de satélite – como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) e o NDWI (Normalized Difference Water Index) – é possível inferir o vigor vegetativo, a biomassa e o estado hídrico das plantas ao longo do tempo (AHMED et al., 2024; FREITAS, 2020). A aplicação de séries temporais desses índices permite captar as oscilações espectrais associadas ao ciclo fisiológico do cafeeiro, incluindo as respostas à poda e à bionalidade, com potencial para antecipar tendências produtivas (ROSA et al., 2010; VALENTE et al., 2024).

Entretanto, apesar dos avanços, a utilização de imagens orbitais ainda enfrenta limitações, como a interferência de nuvens em determinadas épocas do ano, a heterogeneidade entre talhões e a necessidade de calibrar modelos para contextos regionais

específicos. Ainda assim, diversos estudos demonstram que a combinação de dados espectrais com abordagens estatísticas pode gerar modelos robustos de previsão da produtividade, com baixos erros médios e capacidade de antecipação de safra (PEREIRA et al., 2019; MANOEL et al., 2024).

Diante desse contexto, a hipótese central deste trabalho é que a análise de séries temporais de índices espectrais, associados à regressão múltipla, pode estabelecer um padrão de comportamento espectral correlacionado à produtividade do café arábica. Assim, o objetivo deste estudo é analisar a relação entre os índices NDVI, SAVI e NDWI e a produtividade de talhões de café arábica submetidos à poda tipo recepa, utilizando imagens do satélite Landsat 8 no município de Capelinha (MG), entre os anos de 2012 e 2024.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Importância econômica**

A cada ano, devido a sua produção mundial e desenvolvimento, o café vem ganhando cada vez mais destaque (FREITAS et al., 2024). Uma das principais regiões produtoras de café mundial é a América do Sul, com o Brasil liderando a produção e exportação desta commodity agrícola (FREITAS et al., 2024). É negociado nas principais bolsas de valores, como a Nova York e Londres, com importância na economia mundial pelo fato de todo o seu processo de obtenção ser responsável pela geração de emprego e renda para milhões de pessoas em todo o mundo (SILVA et al., 2023).

No ano de 2025, o Brasil exportou no período compreendido entre janeiro e maio, um total de mais de 16 milhões de sacas de café, com o café arábica correspondendo a 84% deste café (CECAFÉ, 2025). Os principais destinos deste café são: EUA (17,1%), Alemanha (12,6%), Itália (8,2%) e Japão (6,5%) (CECAFÉ, 2025).

De acordo com dados da FAO, o Brasil no ano de 2023 produziu 3.405.267 toneladas de café, colhidos em 1.920.889 hectares. Minas Gerais é o maior produtor de café do país, responsável por 50% da produção nacional (SANTANA et al., 2024). Em 2023, Minas Gerais colheu 1.735.408 toneladas em 1.070.358 hectares, sendo o município de Patrocínio, o maior produtor do estado (IBGE). No Alto Jequitinhonha a cafeicultura é uma atividade de expressão, exercendo importante papel socioeconômico, por contribuir na geração de empregos, renda e dinamismo da economia regional (FARNEZI et al., 2010).

## 2.2. Relevância da estimativa de safra para o setor cafeeiro

A estimativa de safra cafeeira constitui uma atividade estratégica para o planejamento e a estabilidade do setor produtivo, sendo essencial tanto para o produtor rural quanto para agentes econômicos e institucionais. Para o cafeicultor, antecipar a produtividade esperada permite a tomada de decisões mais assertivas quanto à aplicação de insumos, contratação de mão de obra, uso de maquinário e planejamento logístico da colheita (PEREIRA et al., 2017). Além disso, a estimativa prévia do potencial produtivo orienta práticas de manejo como adubação corretiva e definição de cronogramas operacionais.

Em escala nacional e internacional, o café é uma commodity agrícola de elevada sensibilidade ao balanço entre oferta e demanda. Por esse motivo, previsões de quebra ou supersafra impactam diretamente os preços negociados nas bolsas de mercadorias, como as de Nova York e Londres (PEREIRA et al., 2017). Assim, a antecipação de dados confiáveis sobre a safra futura reduz a volatilidade do mercado, orienta políticas públicas de apoio à produção e facilita a gestão de contratos comerciais e de exportação (XAVIER et al., 2022). As instituições financeiras, por sua vez, também utilizam essas estimativas na concessão de crédito e seguros agrícolas, devido à sua relevância na análise de riscos.

Tradicionalmente, no Brasil, a estimativa de safra de café é realizada principalmente por dois órgãos oficiais: o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). A Conab executa quatro levantamentos anuais, abrangendo todas as fases do ciclo produtivo do café – da florada à colheita – e utilizando metodologias como entrevistas com produtores, observações de campo e amostragem de frutos por ramo (CONAB, 2024). Já o IBGE realiza o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), com base em informações das Comissões Municipais e Estaduais de Estatística Agropecuária.

Além dessas abordagens empíricas, métodos quantitativos vêm sendo incorporados para estimativas mais robustas. Modelos agrometeorológicos relacionam variáveis climáticas (temperatura, precipitação, disponibilidade hídrica) aos estágios fenológicos do cafeeiro, permitindo antecipar o potencial de produção com base no histórico climático da lavoura (NUNES et al., 2010). Tais modelos também consideram o balanço hídrico e as exigências fisiológicas da cultura em períodos críticos, como a florada e a granação dos frutos.

Todavia, diversos desafios comprometem a precisão das estimativas. A heterogeneidade das lavouras em relação à cultivar, idade, espaçamento, sistema de manejo,

topografia e solo dificulta a padronização dos modelos (PEREIRA et al., 2017). Soma-se a isso a bienalidade produtiva do cafeeiro, fenômeno fisiológico em que se alternam anos de alta e baixa produção, muitas vezes exacerbado por estresses climáticos (SANTOS; CAMARGO, 2006 apud PEREIRA et al., 2017). Até recentemente, a ausência de um mapeamento espacial detalhado das lavouras também dificultava a obtenção de estimativas confiáveis em grandes territórios.

### **2.3. Uso de dados espectrais na estimativa de safra de café**

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto orbital tem proporcionado novas abordagens para o monitoramento agrícola, especialmente para culturas perenes como o café. Dentre suas aplicações, destaca-se a estimativa de safra por meio da análise de séries temporais de dados espectrais, captados por sensores a bordo de satélites como Landsat, Sentinel-2 e MODIS (FREITAS et al., 2024). Tais sensores possibilitam o acompanhamento contínuo da vegetação, com grande cobertura espacial e periodicidade regular, sendo uma alternativa às metodologias convencionais baseadas apenas em visitas a campo.

Os índices espectrais, como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), constituem métricas derivadas das bandas de reflectância no vermelho e infravermelho próximo, utilizadas para representar o vigor vegetativo e a biomassa das plantas. O NDVI é amplamente empregado na agricultura de precisão e apresenta forte correlação com a produtividade de culturas perenes, como o cafeeiro (PEREIRA et al., 2019). Valores elevados do NDVI indicam áreas com alta densidade foliar e maior atividade fotossintética, características associadas a lavouras mais produtivas (SCARAVONATTO et al., 2022).

Além do NDVI, outros índices são utilizados para aperfeiçoar a estimativa de produtividade. O SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) busca corrigir a influência do solo exposto em áreas com baixa cobertura vegetal, enquanto o EVI (Índice de Vegetação Aprimorado) incorpora ajustes atmosféricos e melhora a sensibilidade em vegetações densas (AHMED et al., 2024). Estudos comparativos apontam que o NDVI e o SAVI apresentam maior estabilidade e melhor desempenho para lavouras de café em condições tropicais, sendo preferidos em análises espectro-temporais (ROSA et al., 2010; MANOEL et al., 2024).

O uso de séries temporais desses índices permite identificar padrões sazonais e interanuais da cultura, sendo particularmente útil para modelar a produtividade considerando o fenômeno da bienalidade. Quando integrados a modelos estatísticos ou de aprendizado de

máquina (*machine learning*), esses dados possibilitam a predição antecipada da safra com elevado grau de acurácia (PEREIRA et al., 2019). Modelos que combinam variáveis espectrais com dados meteorológicos têm alcançado erros médios inferiores a 5%, com vantagem adicional de permitir estimativas meses antes da colheita (ROSA et al., 2010).

Apesar das vantagens, a aplicação de dados espectrais na cafeicultura ainda enfrenta limitações. Entre os desafios estão a interferência de nuvens, especialmente na estação chuvosa, a necessidade de calibração dos modelos por região e a variabilidade edafoclimática e genética entre talhões (FREITAS, 2020). Além disso, a interpretação dos índices deve considerar o estágio fenológico da cultura, pois copas densas em anos de bienalidade negativa podem refletir alta vegetação sem correspondência direta com a frutificação (VALENTE et al., 2024).

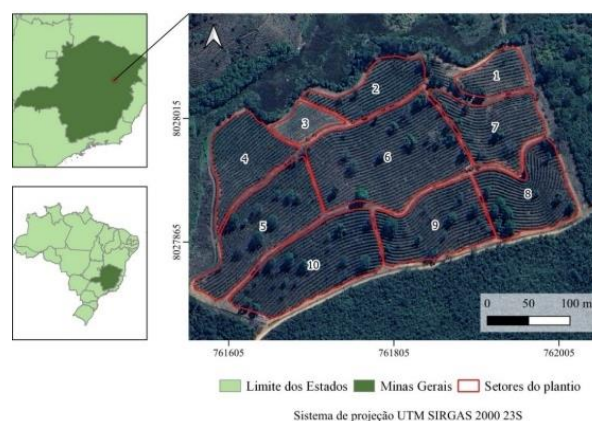
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Local do experimento

O estudo foi conduzido em propriedade agrícola, com coordenadas: -17.820375 e -42.530024, localizada em Capelinha, estado de Minas Gerais. De acordo com a classificação de Köppen, o município é caracterizado como Cwb, estando a 893 metros de altitude (Alvares et al., 2013) (Figura 1).

A propriedade dedica-se à produção de café arábica (*Coffea arabica* L.) sob sistema de cultivo irrigado, adotando a colheita semi-mecanizada.

Figura 1 – Local de condução do experimento e respectiva delimitação dos talhões.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

### 3.2. Procedimento de recepa

A partir do ano de 2016, deu-se início ao procedimento de recepa. Inicialmente a prática foi realizada em talhões específicos, selecionados conforme critérios técnicos. Progressivamente, a recepa foi aplicada nos demais talhões nos anos subsequentes. A recepa consiste em uma poda radical das plantas, visando a renovação vigorosa da vegetação. Este manejo resulta inevitavelmente na ausência de colheita no ano agrícola imediatamente subsequente à sua realização.

### 3.3. Descrição dos talhões

A altitude e a declividade de cada talhão são descritas na tabela 1. Além destas informações, de acordo com o produtor rural os talhões possuem as seguintes características:

- **Talhão 1** - apresenta solo mais arenoso, umidade variável e menor número de brotações, sendo manejado de forma mecanizada.
- **Talhão 2** - manejo totalmente manual e apresentando baixa produtividade.
- **Talhão 3** - foi formado com mudas de baixa qualidade e queimadas pelo sol, o que prejudicou seu desenvolvimento. Sofre também com bordadura, competição por luz e nutrientes.
- **Talhão 4** - caracterizado por solo pedregoso e parte de seu manejo é feito manualmente; foi replantado em 2004 e recebeu poda tipo decote em 2018 e recepa em 2023.
- **Talhão 5** - solo arenoso, manejo mecanizado, apresentando poucas brotações.
- **Talhão 6** - manejo mecanizado integral.
- **Talhão 7** - totalmente mecanizado, com alto potencial produtivo ainda não plenamente explorado.
- **Talhão 8** apresenta relevo irregular em parte da área, exigindo manejo manual em três ruas.
- **Talhão 9** - em área de relevo irregular. As plantas apresentam sintomas frequentes de estresse, possivelmente relacionados a problemas de solo, irrigação ou pragas.
- **Talhão 10** - é inteiramente mecanizado, também com potencial produtivo não atingido.

Tabela 1 – Altitude e declividade de dez talhões de cafeeiro, com adoção da prática de recepa no município de Capelinha –MG.

<b>Talhão</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Declividade (%)</b>
1	820.40	21.10
2	821.81	15.92
3	823.60	25.75
4	821.65	23.60
5	837.98	15.14
6	835.21	13.36
7	833.81	13.61
8	847.94	14.81
9	847.71	15.88
10	847.80	11.68

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

### 3.4. Aquisição do banco de dados

Foi utilizado o satélite Landsat 8 OLI, especificamente os dados de reflectância da superfície provenientes do sensor Operational Land Imager (OLI). Esses dados correspondem ao produto de nível 2, indicando que passaram por um processo avançado de correção atmosférica baseado no modelo 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) (VERMOTE et al., 2016). Essa correção teve como objetivo reduzir distorções atmosféricas que poderiam comprometer a precisão dos valores de refletância registrados, assegurando maior autenticidade e confiabilidade para análises posteriores (RICHTER; SCHLÄPFER, 2003).

A escolha do satélite Landsat 8 foi fundamentada em suas características técnicas favoráveis, como a resolução espacial de 30 metros e o intervalo de revisita de 16 dias. Ademais, é um dos satélites gratuitos com maior resolução espacial disponível, contando com um acervo consistente de imagens desde 2013.

As imagens selecionadas corresponderam a composições anuais obtidas preferencialmente entre os meses de junho e setembro, conforme a disponibilidade. O critério adotado para a seleção das imagens buscou minimizar a interferência de nuvens, sendo escolhidas imagens cuja cobertura total por nuvens fosse inferior a 10% (Tabela 2).

Tabela 2 – Data de coleta da imagem do satélite Landsat 8 e a porcentagem de cobertura pelas nuvens.

<b>Data da imagem</b>	<b>Cobertura de nuvens</b>
29/06/2024	0%
23/07/2023	0%
08/06/2022	0%
21/06/2021	2,34%
02/06/2020	5,4%
02/07/2019	3,56%
31/07/2018	1,93%
10/06/2017	0%
10/08/2016	0%
08/08/2015	9,57%
05/08/2014	0,01%
02/07/2013	2,7%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A aquisição dos dados foi realizada por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), ferramenta de processamento geoespacial baseada em nuvem, que disponibiliza um extenso catálogo de imagens de satélite, incluindo séries temporais do Landsat (GORELICK et al., 2017).

Neste estudo foram utilizados índices espectrais específicos para a representação espectral da cultura do café, com o intuito de reduzir a dimensionalidade dos dados. Trabalhar com séries temporais utilizando todas as bandas disponíveis seria computacionalmente exigente. Os índices espectrais aplicados resultam de operações matemáticas que destacam características específicas da vegetação ou condições ambientais, sendo essenciais para monitorar aspectos como saúde vegetal, umidade e biomassa (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi amplamente utilizado devido à sua capacidade de indicar o vigor e a saúde vegetativa (LIU; HUETE, 1995):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Em que NIR: Refletância da banda do infravermelho próximo; Red: Refletância da banda vermelha

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) foi utilizado por aprimorar o NDVI através da introdução de um fator específico que reduz a interferência da reflectância do solo, particularmente útil em áreas com vegetação esparsa ou irregularmente distribuída:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED) * (1 + L)}{NIR + RED + L} \quad (2)$$

L: Fator de ajuste para atenuar o efeito do solo, normalmente entre 0 e 1

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) foi empregado para monitorar a umidade superficial presente tanto na vegetação quanto no solo, auxiliando na identificação de mudanças em condições hídricas. O NDWI é calculado pela diferença entre as refletâncias das bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas (GAO, 1996):

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (3)$$

SWIR: Refletância da banda do infravermelho de ondas curtas

### 3.5. Etapa de processamento dos dados

Foram extraídos os valores espectrais correspondentes ao pixel localizado no centróide de cada talhão agrícola avaliado, dando origem a um banco de dados que reúne a produtividade anual dos talhões e os valores anuais dos índices NDVI, SAVI e NDWI.

Inicialmente, procedeu-se a uma análise exploratória da relação entre a produtividade agrícola e esses índices espectrais, utilizando o coeficiente de Pearson para mensurar a força e a direção da correlação linear entre variáveis contínuas. Esse passo permitiu verificar se determinados índices apresentavam associação estatisticamente significativa com a produtividade, com atenção especial aos anos caracterizados por baixa produtividade, possivelmente condicionada pela bienalidade típica da cultura do café.

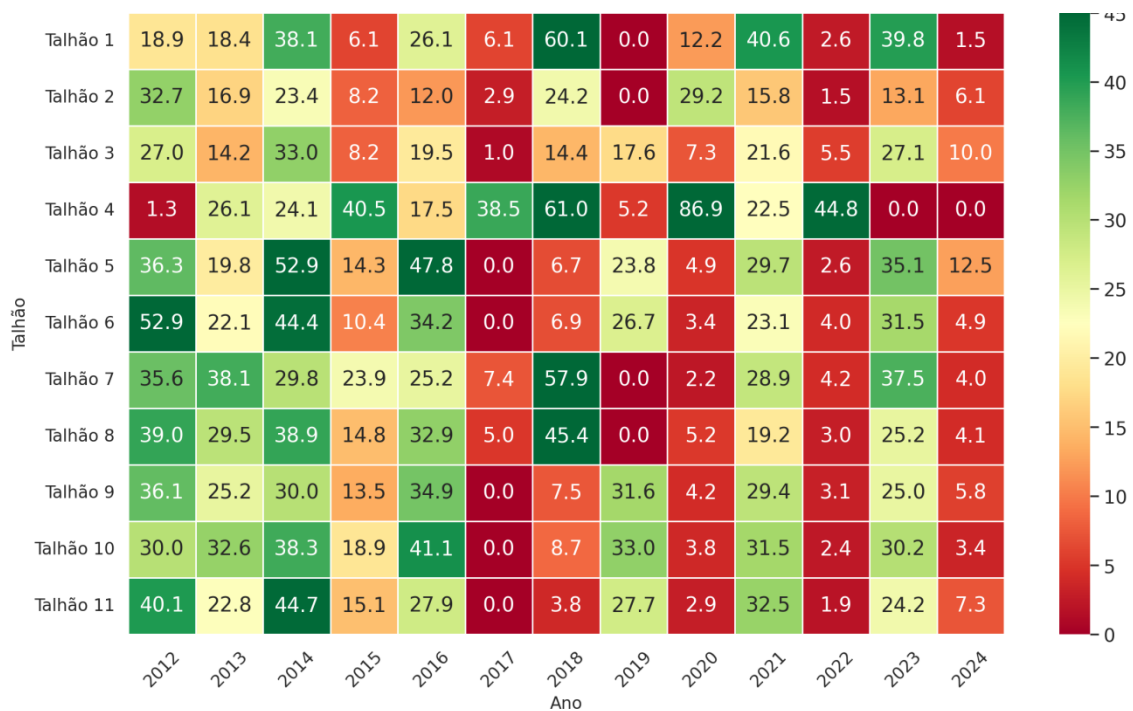
Tendo em vista que essa bienalidade pode manifestar-se de forma distinta em cada talhão, realizou-se, em seguida, uma análise de correlação de Pearson individual para cada área produtiva. Dessa forma, pôde-se avaliar se os índices espectrais eram capazes de capturar o comportamento produtivo específico de cada talhão ao longo do tempo. Nos casos em que a correlação mostrou-se estatisticamente significativa, avançou-se para o ajuste de um modelo de regressão linear múltipla, empregando os índices NDVI, SAVI e NDWI como variáveis independentes. A estimação dos coeficientes de regressão foi conduzida pelo método dos mínimos quadrados ordinários, e o desempenho do modelo foi mensurado pelo coeficiente de

determinação ( $R^2$ ), que expressa a proporção da variância na produtividade explicada pelos índices espectrais.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na série temporal de produtividade dos talhões entre os anos de 2012 e 2024, é possível observar transformações significativas nos padrões produtivos associados ao ciclo fisiológico do cafeeiro, especialmente em resposta à poda de renovação (recepta). No período anterior à poda, entre 2012 e 2014, os dados revelam uma produtividade estável com flutuações moderadas, em que a bienalidade se manifestava de forma menos acentuada. Nessa fase, os anos pares, como 2014, representavam os picos produtivos, sinalizando um equilíbrio fisiológico consistente na lavoura (Figura 2).

Figura 2 – Heatmap da produtividade (sacas/ha) de acordo com o talhão e o ano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esse padrão de alternância moderada é compatível com o que Cannell (1971) descreve como uma fase de maturidade vegetativa com alocação equilibrada de biomassa entre crescimento e frutificação. Além disso, segundo DaMatta et al. (2007), em ambientes bem manejados, a bienalidade tende a ser suavizada por fatores como irrigação e nutrição

adequadas, o que justifica a estabilidade observada antes da recepa para alguns talhões. No entanto, esse equilíbrio se rompe com o início do declínio fisiológico observado em 2015 e 2016, culminando na recepa generalizada em 2017.

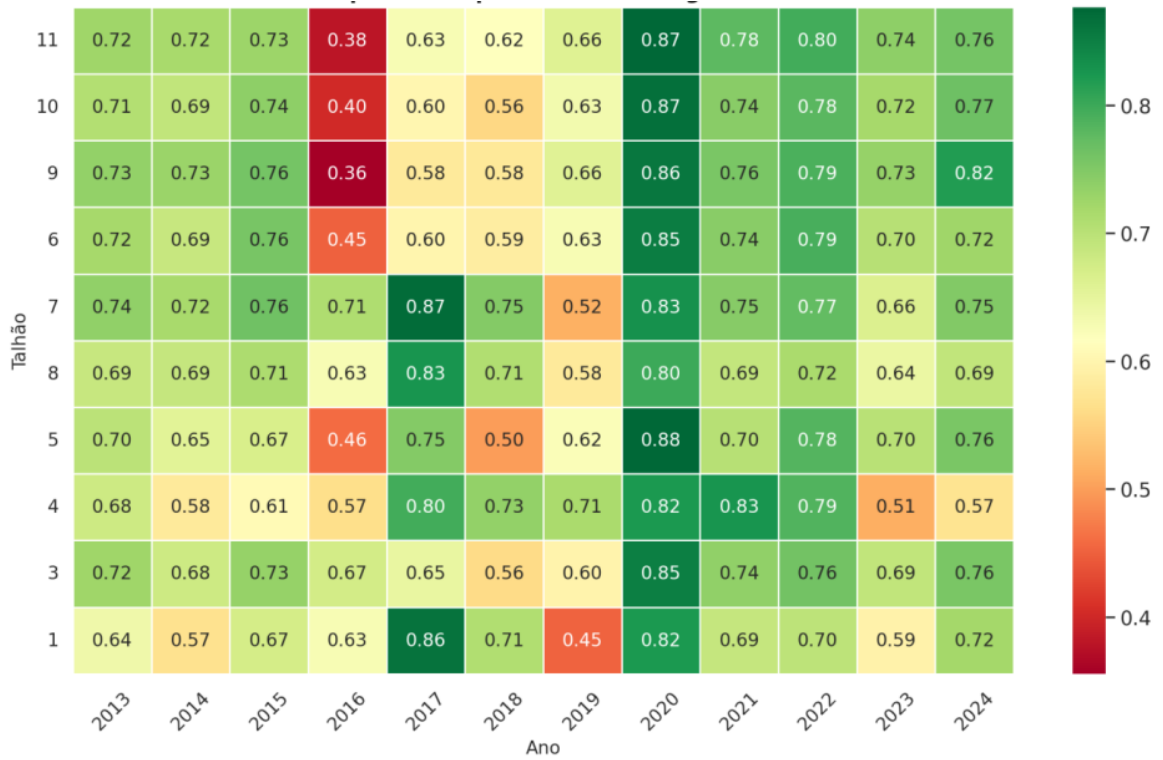
A poda representa uma intervenção drástica no sistema produtivo do cafeeiro e reinicia seu ciclo fisiológico. Após a recepa, os talhões exibem um comportamento produtivo mais errático e uma intensificação da bienalidade. A alternância entre anos de alta e baixa se torna mais pronunciada, com diferenças superiores a  $40 \text{ sc ha}^{-1}$  entre ciclos consecutivos em alguns setores. Merga e Etana (2023) demonstram que a recepa, embora necessária para a renovação do dossel, desencadeia desequilíbrios fisiológicos transitórios que intensificam os efeitos da bienalidade, especialmente nos primeiros anos de recuperação.

Outro ponto notável é a inversão do padrão cronológico da bienalidade. Enquanto antes da recepa os anos pares eram os principais anos de pico, após o corte os anos ímpares — como 2019 e 2021 — passam a apresentar maior produtividade. Esse deslocamento temporal é um reflexo direto da redefinição do ciclo vegetativo-reprodutivo provocado pela poda.

Garcia e Orians (2022) argumentam que a intensificação da bienalidade após a poda está relacionada a *trade-offs* fisiológicos entre crescimento vegetativo e reprodutivo. A planta prioriza a formação de novas estruturas vegetativas, o que compromete temporariamente sua capacidade produtiva, amplificando o ciclo de alternância. Esse fenômeno é ainda mais complexo em sistemas irrigados, onde, apesar da estabilidade hídrica, a bienalidade continua a se manifestar de forma acentuada (CHARBONNIER et al., 2017).

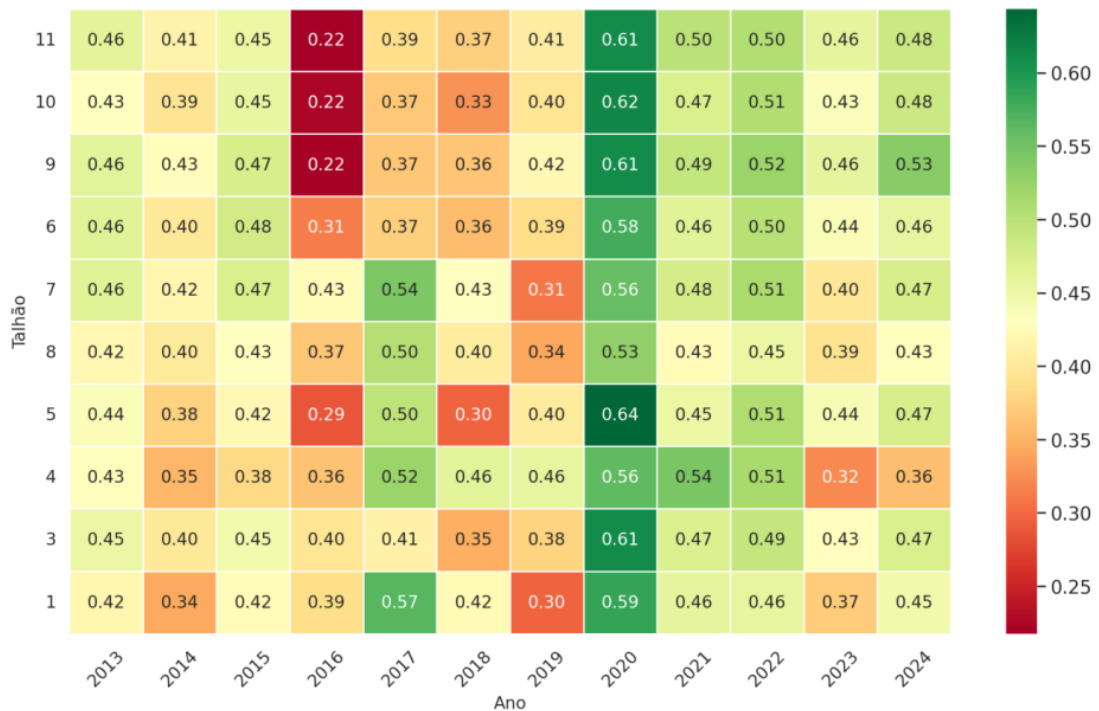
A variação nos índices espectrais nas áreas recepadas (talhões 1, 2 e 5 a 9) apresentou-se de forma evidente já no ciclo anterior à poda, entre 2016 e 2017, indicando respostas fisiológicas da planta ao manejo intensivo (Figura 3). Nessa fase, observou-se uma queda abrupta no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Figura 4), que normalmente varia entre 0,70 e 0,76, mas nesse contexto alcançou patamares significativamente inferiores, entre 0,36 e 0,46. Tal comportamento também foi registrado no Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) (Figura 5), cujos valores oscilaram entre 0,22 e 0,31, bem como no Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) (Figura 6), que apresentou valores levemente negativos (-0,09 a -0,04), sinalizando redução de umidade no dossel (Valente et al., 2024; Thao et al., 2022).

Figura 3 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada nas áreas recepadas de acordo com o talhão e o ano.



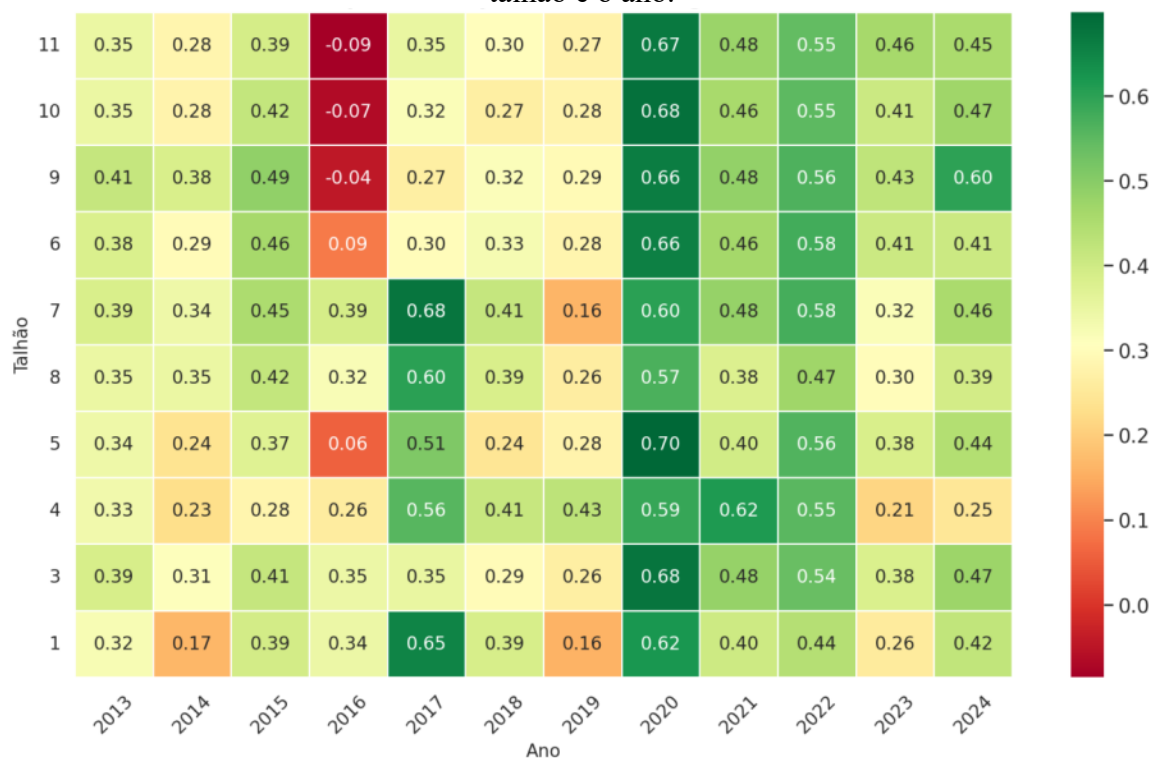
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 4 - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo nas áreas recepadas de acordo com o talhão e o ano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 5 - Índice de Diferença Normalizada da Água nas áreas recepadas de acordo com o talhão e o ano.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esses indicadores são amplamente reconhecidos como ferramentas eficazes para o monitoramento da dinâmica da vegetação e da condição hídrica do dossel, especialmente em culturas perenes como o cafeeiro (FREITAS, 2020; MANOEL et al., 2024). A antecipação dessas variações espectrais ao ano de colheita zero (2017) destaca seu potencial preditivo, sendo úteis na definição do calendário de poda e no ajuste da adubação prévia (PARIDA, 2024; LE et al., 2023).

No tocante à recuperação pós-recepa, os índices espectrais voltaram a subir nos anos subsequentes (2018–2019), atingindo seus picos apenas em 2020 para a maioria dos talhões. Por exemplo, o talhão 1 atingiu um NDVI de 0,82 em 2020, com produtividade máxima de 40,6 sacas por hectare em 2021. Já o talhão 5 alcançou NDVI de 0,88 no mesmo ano, apresentando pico produtivo de 29,7 sc ha<sup>-1</sup> também em 2021, evidenciando um padrão de defasagem de um ano entre resposta vegetativa e produtiva. O talhão 7, por sua vez, destacou-se por atingir o NDVI máximo (0,83) já em 2018, com produtividade recorde de 57,9 sc ha<sup>-1</sup> no mesmo ano, sem defasagem perceptível. Casos como os dos talhões 8 e 10 demonstram variações específicas, cujas respostas podem ser atribuídas a fatores

edafoclimáticos e fisiológicos, como velocidade de brotação e vigor de recuperação (XIAO et al., 2024; ROSA et al., 2024).

A análise da relação entre os índices espectrais e a produtividade do cafeeiro revela nuances fundamentais que decorrem da interação entre o ciclo fisiológico da planta, práticas de manejo como a recepa, e as condições ambientais. Um dos pontos de destaque é a relevância da defasagem de um ano, observada especialmente quando a sequência fisiológica ocorre de forma contínua e favorável — ou seja, quando a planta passa por recepa, apresenta uma brotação vigorosa e logo em seguida entra em frutificação. Nesse contexto, o NDVI medido em setembro se mostra altamente correlacionado com a área foliar efetiva que sustentará a próxima safra, atingindo coeficientes de correlação superiores a 0,9 (Tabela 3). Essa alta correlação é indicativa de que o dossel captado por sensores ópticos representa, de fato, o potencial fotossintético da lavoura para a produção futura, como observado por Valente et al. (2024) em sistemas cafeeiros sob condições similares.

Tabela 3 - Correlação de Pearson entre a produtividade e os índices espectrais para safras de 2013 a 2024

Ano	NDVI	p-valor	SAVI	p-valor	NDWI	p-valor
2014	0.27	0.42	0.06	0.83	0.08	0.77
2015	0.12	0.72	-0.03	0.93	-0.26	0.45
2016	-0.49	0.13	-0.5	0.13	-0.61	0.07
2017	-0.58	0.08	-0.59	0.07	-0.6	0.07
2018	0.91	0	0.88	0	0.91	0
2019	0.57	0.2	0.6	0.17	0.28	0.42
2020	-0.36	0.35	-0.3	0.43	-0.44	0.23
2021	-0.22	0.58	0.01	0.98	-0.27	0.35
2022	0.19	0.61	0.25	0.5	0.15	0.63
2023	0.49	0.15	0.46	0.19	0.31	0.3
2024	0.45	0.17	0.49	0.15	0.43	0.19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Contudo, essa correlação pode perder força ou até mesmo inverter o sinal em situações de bienalidade negativa ou quando a lavoura já passou pelo pico produtivo. Nesses anos, mesmo que o NDVI se apresente elevado, ele pode estar refletindo uma maior área foliar voltada à recuperação de reservas carbonadas, e não necessariamente ao desenvolvimento de estruturas reprodutivas, como demonstrado por Thao et al. (2022).

Vale ressaltar a questão do tamanho amostral e da heterogeneidade entre os blocos impõe limitações significativas à inferência estatística. O pequeno número de talhões (10) e a

diversidade de manejos aplicados — que incluem diferenças em fertirrigação, cultivares e idade desde a recepa — elevam o erro padrão das estimativas e dificultam a obtenção de valores de  $p$  estatisticamente significativos. Como ressaltado por Santana et al. (2022), esses fatores são comuns em experimentos de campo em lavouras comerciais, onde o controle de variáveis é mais limitado do que em condições experimentais.

O comportamento anual dos coeficientes da regressão múltipla com os índices espectrais NDVI, SAVI e NDWI revela padrões distintos de resposta da produtividade do cafeeiro, em consonância com as fases do ciclo de recepa, os efeitos da bienalidade e as relações estatísticas entre os próprios índices espectrais (Tabela 4). A análise destaca que o modelo apresenta excelente capacidade explicativa em determinados anos, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,80, especialmente entre 2018 e 2020. Esses anos coincidem com duas fases críticas: o primeiro pico produtivo após a recepa generalizada de 2017 (em 2018), e os anos subsequentes (2019–2020), marcados por dosséis já plenamente recompostos e em condições de máximo aproveitamento fotossintético.

Tabela 4 – comportamento anual dos coeficientes da regressão múltipla com os índices espectrais NDVI, SAVI e NDWI.

Ano	Coef NDVI	Coef SAVI	Coef NDWI	Intercepto	$R^2$
2014	204.56	-239.92	79.87	-12.84	0.3165
2015	197.89	-56.3	-91.79	-37.72	0.1863
2016	-136.33	367.95	-275.35	119.14	0.4041
2017	-5.64	42.69	26	4.52	0.3223
2018	168.96	-90.67	-48.17	-36.46	0.8647
2019	-31.29	28.72	3.13	13.99	0.7954
2020	-158.23	453.84	-372.92	167.91	0.814
2021	-187.28	532.87	-470.57	207.58	0.6828
2022	-153.83	304.62	-317.36	155.45	0.7171
2023	-74.23	110.75	-102.92	47.66	0.5226
2024	-98.82	221.8	-208.03	94.27	0.5985

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

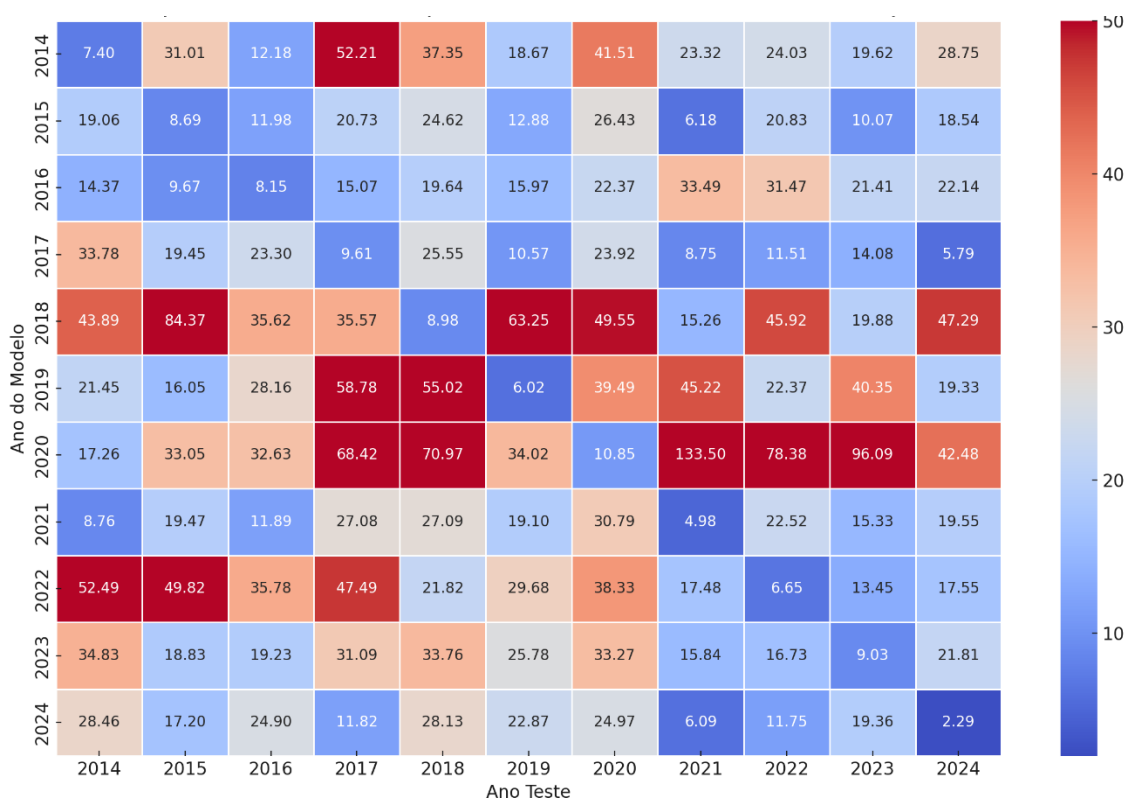
Quando há variação significativa entre os talhões em termos de área foliar e carga de frutos — típica de fases iniciais pós-poda ou de plena maturação —, os índices espectrais fornecem contraste suficiente para explicar até 86% da variância produtiva. Isso reforça o papel de sensores remotos na detecção de heterogeneidade espacial no vigor vegetativa e reprodutiva, conforme discutido por Rosa et al. (2024) e Valente et al. (2024). Em contrapartida, o poder explicativo da regressão cai drasticamente nos anos pré-recepa (2013–

2015) ou de recuperação desuniforme (2023–2024), com  $R^2$  variando entre 0,18 e 0,60. Nesses cenários, os índices espectrais podem capturar apenas variações visuais — como áreas com folhas em excesso ou solo exposto — que não se traduzem em diferenças reais de safra.

Um fenômeno particularmente interessante emerge nos períodos de exaustão fisiológica e pré-poda, como em 2015–2016 e 2020–2022: o coeficiente de NDVI assume sinal negativo, enquanto o de SAVI cresce e se torna fortemente positivo. Este padrão pode ser explicado por dois fatores: primeiramente, em "anos-fora", copas densas indicadas por NDVI elevado refletem acúmulo de biomassa vegetativa não necessariamente associada à frutificação, pois a planta pode estar em recuperação de reservas carbonadas (SANTANA et al., 2022). Em segundo lugar, a forte colinearidade entre NDVI e SAVI ( $r \approx 0,9$ ) interfere na interpretação dos betas. Como ambos medem características similares da vegetação, o modelo redistribui o peso entre eles, dependendo de pequenas flutuações na amostra. Isso resulta, muitas vezes, na inversão de sinais ou em betas elevados para compensar sobreposições explicativas — um problema clássico de multicolinearidade, conforme destacado por Yu et al. (2024).

Os resultados obtidos por meio da análise de erros médios quadráticos (RMSE) entre modelos espectrais de predição de produtividade em lavouras de café revelam padrões altamente dependentes do estágio fenológico da cultura, bem como da estrutura do dossel ao longo do ciclo de manejo. A partir da matriz de calor, observa-se que os modelos gerados nos anos de 2015, 2016 e 2017 apresentaram os melhores desempenhos gerais, com RMSE médios significativamente inferiores nos testes cruzados — inclusive em anos de alta, média e baixa produtividade. Essa consistência sugere que os modelos desses anos foram calibrados com dados provenientes de um espectro mais amplo de condições fisiológicas da planta, abrangendo desde o declínio produtivo pré-recepa até a recuperação inicial pós-corte.

Figura 7 – Heatmap RMSE dos Modelos Aplicados em Todos os Anos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esse comportamento é corroborado por Nascimento (2019), que evidencia que modelos espectrais calibrados com variabilidade interna elevada, especialmente em anos de transição fenológica, tendem a apresentar maior capacidade de generalização. O autor destaca que a inclusão de talhões com produtividades contrastantes melhora a capacidade dos algoritmos de machine learning e regressão multivariada em capturar padrões robustos de resposta espectral.

No caso do modelo de 2015, por exemplo, observa-se  $RMSE < 25 \text{ sc ha}^{-1}$  na maioria dos anos-teste, inclusive em anos de produtividade extrema como 2020 e 2023. Isso pode ser atribuído à combinação de coeficientes moderados, menor multicolinearidade entre os índices (NDVI, SAVI, NDWI), e à ausência de dados extremos no conjunto de treinamento. Tais características são consideradas ideais para evitar sobreajuste e aumentar a portabilidade dos modelos, conforme também discutido por Freitas (2020).

Em contrapartida, os modelos ajustados em anos como 2018 (primeira safra cheia pós-recepa) e 2020 (bienalidade negativa com dossel fechado) apresentaram desempenho inferior em generalização. Esses anos refletem cenários fisiológicos extremos — respectivamente, dosséis super-vigorosos e áreas de exaustão fotossintética — o que produz

coeficientes de regressão (betas) desproporcionalmente elevados. Como consequência, esses modelos apresentaram RMSE superiores a  $40 \text{ sc ha}^{-1}$  quando aplicados a anos fora de seu domínio.

Os resultados confirmam que a relação entre índices espectrais e produtividade é dinâmica e sensível às rupturas causadas por poda e bienalidade. Essa constatação invalida a hipótese de existência de um modelo universal de regressão espectral estável ao longo de diferentes fases do ciclo cafeeiro.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a relação entre os índices espectrais e a produtividade do cafeeiro é dinâmica e altamente sensível às rupturas causadas por práticas de manejo, como a poda de recepa, e pelo fenômeno da bienalidade.

Esta constatação invalida a hipótese central do trabalho, que pressupunha a existência de um modelo de regressão espectral universal e estável ao longo das diferentes fases do ciclo cafeeiro. Os resultados demonstraram que o poder explicativo dos modelos de predição varia drasticamente de acordo com o estágio fenológico da cultura, alcançando maior eficácia ( $R^2 > 0,80$ ) apenas em anos de grande heterogeneidade entre os talhões, como no período de recuperação pós-poda. Em contrapartida, a capacidade preditiva diminui em fases de maior homogeneidade ou de estresse fisiológico. Portanto, um modelo único não é viável para prever a produtividade de forma consistente ao longo dos anos.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Z.; SHEW, A.; NALLEY, L.; POPP, M.; GREEN, V. S.; BRYE, K. An examination of thematic research, development, and trends in remote sensing applied to conservation agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 12, n. 1, p. 77-95, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633923000278>>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- ALVARES, C. A; STAPE, J. L; SENTELHAS, P. C; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22 (6), 711-728, 2013.
- ARANTES, K. R.; FARIA, M. A. de; REZENDE, F. C. Recuperação do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) após recepa, submetido a diferentes lâminas de água e parcelamentos da adubação. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 313-319, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/asagr/a/QP5RJhJPSZHZVSndL64gCd/?format=html&lang=pt>>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- BAITELLE, D. C; VERDIN FILHO, A. C; FREITAS, S. de J; MIRANDA, G. B; VIEIRA, H. D; VIEIRA, K. M. Cycle pruning programmed on the grain yield of arabica coffee. **Ciência e Agrotecnologia**, 43, e014419, 2019.
- BAITELLE, D.C., Poda programada de ciclo no cafeeiro arábica. Dissertação (M em Produção Vegetal). **Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro**, Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro, Brasil, 124p, 2018.
- BERNARDES, T.; MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; GIAROLLA, A.; RUDORFF, B. F. T. Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS remote sensing imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 9, p. 2492-2509, 2012. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/4/9/2492>>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- CANNELL, M. G. R. Production and distribution of dry matter in trees of *Coffea arabica* L. in Kenya as affected by seasonal climatic differences and the presence of fruits. **Annals of Applied Biology**, v. 67, p. 15-30, 1971. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7348.1971.tb02910.x>>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- CECAFÉ. **Relatório Mensal de Exportações**. 2025. Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/publicacoes/relatorio-de-exportacoes/>>. Acesso em: 13 julho. 2025.
- CHARBONNIER, F.; ROUPSARD, O.; LE MAIRE, G.; [...]; DREYER, E. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell and Environment**, v. 40, p. 1592-1608, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pce.12964>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. D. S. C. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, 7(1), 31-45, 2013.

COLODETTI, T. V.; TOMAZ, M. A.; RODRIGUES, W. N.; VERDIN FILHO, A. C.; CAVATTE, P. C.; REIS, E. F. Arquitetura da copa do cafeeiro arábica conduzido com diferentes números de ramos ortotrópicos. **Revista Ceres**, v. 65, n. 5, p. 415-423, 2018. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rceres/a/bz5nsRswHJhsQ7djzBZVvzS/?format=html&lang=pt>>.

Acesso em: 12 jul. 2025.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café – 2º Levantamento 2024**. Brasília: Conab, 2024.

DAVIS, A. P.; GOLE, T. W.; BAENA, S.; MOAT, J. The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **PloS One**, v. 7, n. 11, e47981, 2012. Disponível em:

<<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0047981>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

EMBRAPA. **Boas Práticas Agrícolas Aplicadas à Lavoura Cafeeira Para o Estado de Minas Gerais**; Embrapa Café: Brasília, Brasil, 2022.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organisation of the United Nations Statistical Database**. Statistical Division, FAO, Rome. 2025. Disponível em:

<<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 13 de jul. 2025.

FARNEZI, M. M. de M.; SILVA, E. de B.; GUIMARÃES, P. T. G.; PINTO, N. A. V. D. Levantamento da qualidade da bebida do café e avaliação do estado nutricional dos cafeeiros do Alto Jequitinhonha, Minas Gerais, através do DRIS. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 5, p. 1191-1198, 2010. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/cagro/a/NwqXjdZ6fQ8t4CgRPvgYrZx/?lang=pt>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

FREITAS, R. A. S. M. Caracterização espectral de cultivares de cafeeiros e monitoramento de parâmetros fitotécnicos após a poda a partir de imagens multiespectrais. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – **Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2020, 76 f. Disponível em:<

<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/31135>>. Acesso em: 13 de jul. 2025.

FREITAS, V. V.; BORGES, L. L. R.; VIDIGAL, M. C. T. R.; dos SANTOS, M. H.; STRINGHETA, P. C. Coffee: a comprehensive overview of origin, market, and the quality process. **Trends in Food Science & Technology**, v. 146, article 104411, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224424000876>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

GARCIA, G. M.; ORIAN, C. M. Reproductive tradeoffs in a perennial crop: Exploring the mechanisms of coffee alternate bearing. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 340, art. 108151, 2022. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880922003000>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

HERRERA, J. C.; LAMBOT, C. The coffee tree—Genetic diversity and origin. In: FOLMER, B. (ed.). **The Craft and Science of Coffee**. New York and London: Elsevier, 2017. p. 1–16. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128035207000013>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

JAYAKUMAR, M.; RAJAVEL, M.; SURENDRAN, U.; GOPINATH, G.; RAMAMOORTHY, K. Impact of climate variability on coffee yield in India—with a micro-level case study using long-term coffee yield data of humid tropical Kerala. **Climatic Change**, v. 145, p. 335–349, 2017. Disponível em:

<<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-2101-2>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

LE, T. S.; HARPER, R.; DELL, B. Application of remote sensing in detecting and monitoring water stress in forests. **Remote Sensing**, v. 15, n. 13, art. 3360, 2023. Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2072-4292/15/13/3360>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

LOVELAND, T. R.; DWYER, J. L. Landsat: Building a strong future. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 22–29, 2012. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712000351>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MANOEL, M. C.; ROSA, M. R.; QUEIROZ, A. P. Analysis of the Biennial Productivity of Arabica Coffee. **Remote Sensing**, v. 16, n. 20, art. 3833, 2024. Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2072-4292/16/20/3833>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MARTINS, G. D.; GALO, M. D. L. B. T.; VIEIRA, B. S. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 5395–5403, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8016326>>.

Acesso em: 12 jul. 2025.

MARTINS, M. L. Primórdios da cafeicultura no Alto Jequitinhonha, MG: o caso de Capelinha (1973-1995). **Revista Tempos Históricos**, v. 25, n. 2, p. 227–261, 2021.

Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8889643>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MENGUE, V. P.; FONTANA, D. C. Avaliação da dinâmica espectro-temporal visando o mapeamento dos principais cultivos de verão no Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p. 331–340, 2015. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/brag/a/KLCKrfnD5vJsTYZdjhXK87k/?lang=pt>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MERGA, D; ETANA, D. Influences of Salient Agronomic Practices for Mitigation of Biennial Bearing in Coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Plant Sciences**, 8(4), 136–143, 2023.

MORRIS, J. Coffee: A Global History. **Reaktion Books**, 2018.

NARITOMI, J.; SOARES, R. R.; ASSUNÇÃO, J. J. Institutional development and colonial heritage within Brazil. **The Journal of Economic History**, 72(2), 393–422, 2012.

NUNES, M. C. M. et al. Aplicação de modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade do cafeeiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 18(2), 213–223, 2010.

OVALLE-RIVERA, O.; LÄDERACH, P.; BUNN, C.; OBERSTEINER, M.; SCHROTH, G. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PloS One**, v. 10, n. 4, e0124155, 2015. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0124155>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

PARIDA, B. R.; MAHATO, T.; GHOSH, S. Monitoring tea plantations during 1990–2022 using multi-temporal satellite data in Assam (India). **Tropical Ecology**, v. 65, n. 3, p. 387–398, 2024. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s42965-023-00304-x>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

PASQUARELLA, V. J.; HOLDEN, C. E.; KAUFMAN, L.; WOODCOCK, C. E. From imagery to ecology: leveraging time series of all available Landsat observations to map and monitor ecosystem state and dynamics. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 2, n. 3, p. 152–170, 2016. Disponível em: <<https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rse2.24>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

PEREIRA, L. R. et al. Estimativa de produtividade de café por meio de métodos de machine learning. **Universidade Federal de Viçosa**, 2019. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/13726>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

PHANG, S. K.; CHIANG, T. H. A.; HAPPONEN, A.; CHANG, M. M. L. From satellite to UAV-based remote sensing: A review on precision agriculture. **IEEE Access**, v. 11, p. 127057–127076, 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10310142>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

RODRIGUES, C.; MAIA, R.; RIBEIRINHO, M.; HILDEBRANDT, P.; GAUTZ, L.; PROHASKA, T.; MÁGUAS, C. Coffee. **Comprehensive Analytical Chemistry**, Elsevier, v. 60, p. 573–598, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444595621000220>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

ROSA, V. G. C.; et al. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1374–1382, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pab/a/VNpDv9LDmdwJJsWg6VFSN5H/?format=html&lang=pt>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

SANTANA, D. B.; RIOS, G. D. S.; LENSE, G. H. E.; RUBIRA, F. G.; FRANCESCHI, F. R. A.; SPALEVIC, V.; AYER, J. E. B.; MINCATO, R. L. Soil and organic carbon losses by water erosion in coffee-growing areas in southern Minas Gerais, Brazil. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 48, n. 3, p. 317–331, 2024. Disponível em: <<https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol48/iss3/1/>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

SANTANA, L. S.; FERRAZ, G. A. S.; SANTOS, S. A.; DIAS, J. E. L. Precision coffee growing: a review. **Coffee Science**, v. 17, art. 72007, 2022. Disponível em: <<https://sbicafe.ufv.br/items/87aa4197-1084-4343-bab9-970d1419269f>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

SCARAVONATTO, F. A. et al. Avaliação de índices de vegetação em cafezais sob diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 16(3), 681–693, 2022.

SENAR – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Café: manejo de podas, desbrotas, irrigação e nutrição do cafeeiro**. Brasília: SENAR, 2016.

SILVA, D. T.; SALDANHA, C. B.; MARTINS, L. O. S.; LOPES, J. M.; SILVA, M. S. Coffee production and geographical indications (GI): an analysis of the world panorama and the Brazilian reality. **Journal of Sustainable Development**, v. 16, n. 3, p. 47, 2023. Disponível em: <<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230228096>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

SMITH, R. F. A history of coffee. In: CLIFFORD, M. N; WILLSON, K. C. (eds). **Coffee**. Boston, MA: Springer US, 1–12, 1985.

TAVARES, P. D. S.; GIAROLLA, A.; CHOU, S. C.; SILVA, A. J. D. P.; LYRA, A. D. A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 873-883, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/S10113-017-1236-Z>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

THAO, N. T. T.; KHOI, D. N.; DENIS, A.; VIET, L. V.; WELLENS, J.; TYCHON, B. Early prediction of coffee yield in the Central Highlands of Vietnam using a statistical approach and satellite remote sensing vegetation biophysical variables. **Remote Sensing**, v. 14, n. 13, art. 2975, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/13/2975>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

VALENTE, G. F.; et al. Remotely Piloted Aircraft for Evaluating the Impact of Frost in Coffee Plants. **Remote Sensing**, v. 16, n. 18, art. 3467, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/16/18/3467>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

VELÁSQUEZ, D.; SÁNCHEZ, A.; SARMIENTO, S.; TORO, M.; MAIZA, M.; SIERRA, B. A method for detecting coffee leaf rust through wireless sensor networks, remote sensing, and deep learning: case study of the Caturra variety in Colombia. **Applied Sciences**, v. 10, n. 2, art. 697, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/697>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

VICTOR, N.; MADDIKUNTA, P. K. R.; MARY, D. R. K.; MURUGAN, R.; CHENGODEN, R.; GADEKALLU, T. R.; RAKESH, N.; ZHU, Y.; PAEK, J. Remote sensing for agriculture in the era of industry 5.0—A survey. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 17, p. 5920-5945, 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10449350>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

VIEIRA, H.D. **Café Rural**. Interciência, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

VOLSI, B.; TELLES, T. S.; CALDARELLI, C. E.; CAMARA, M. R. G. D. The dynamics of coffee production in Brazil. **PloS One**, v. 14, n. 7, e0219742, 2019. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0219742>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

WILLIAMS, D. L.; GOWARD, S.; ARVIDSON, T. Landsat. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 10, p. 1171-1178, 2006. Disponível em: <<https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2006/00000072/00000010/art00005>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

WULDER, M. A.; MASEK, J. G.; COHEN, W. B.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 2-10, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003442571200034X>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

XAVIER, A. C. et al. (Org.). **Cafeicultura sustentável: desafios e perspectivas**. Brasília: Embrapa Café, 2022.

YU, F.; WANG, M.; XIAO, J.; ZHANG, Q.; ZHANG, J.; LIU, X.; PING, Y.; LUAN, R. Advancements in utilizing image-analysis technology for crop-yield estimation. **Remote Sensing**, v. 16, n. 6, art. 1003, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/16/6/1003>>. Acesso em: 12 jul. 2025.