INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

DETERMINAÇÃO DO PONTO DE MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR POR IMAGENS DE SATÉLITE: INTEGRAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Autor: Rogério Pereira Simões
Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Coorientador: Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior
Coorientador: Dr. Lucas Peres Angelini

RIO VERDE - GO
Agosto - 2026

ROGÉRIO PEREIRA SIMÕES

DETERMINAÇÃO DO PONTO DE MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR POR IMAGENS DE SATÉLITE: INTEGRAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

.

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

Coorientador: Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior

Coorientador: Dr. Lucas Peres Angelini

RIO VERDE, GO

Agosto – 2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi

Pereira Simões, Rogério
S616d DETERMINAÇÃO DO PONTO DE MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR POR IMAGENS DE SATÉLITE: INTEGRAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA / Rogério Pereira Simões. RIO VERDE 2026.

117f. il.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. Lucas Peres Angelini.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de 0233144 - Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (Campus Rio Verde).
1. Sensoriamento Remoto. 2. Sustentabilidade. 3. Maturação de cana-de-açúcar. 4. Eficiência Energética. I. Título.

INSTITUTO FEDERAL
Goiano

Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO
PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTIFICA

☐ Tese (doutorado)	☐ Artigo científico
☑ Dissertação (mestrado)	☐ Capítulo de livro
☐ Monografia (especialização)	☐ Livro
☐ TCC (graduação)	☐ Trabalho apresentado em evento
☐ Produto técnico e educacional – Tipo:	

Nome Completo do Autor: | Matrícula

ROGÉRIO PEREIRA SIMÕES | 2024202331440009

Título do Trabalho:

DETERMINAÇÃO DO PONTO DE MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR POR IMAGENS DE SATÉLITE: INTEGRAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☑ Não ☐ Sim. Justifique:

Informe a data em que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: **20/10/2026.**

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☑ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☑ Sim ☐ Não

DECLARRAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

• Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;

• Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;

• Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Goiatuba	20/10/2026.
Local	Data

gov.br Documento assinado digitalmente
ROGERIO PEREIRA SIMOES
Data: 24/10/2026 18:13:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

_____
Assinatura do(a) orientador(a)

gov.br Documento assinado digitalmente
GERALDO ANDRADE DE OLIVEIRA
Data: 27/10/2026 16:17:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 29/2026 - CCMEAS-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

DETERMINAÇÃO DO PONTO DE MATURAÇÃO DA CANA-DE-ACÚCAR POR IMAGENS DE SATÉLITE: INTEGRAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Autor: Rogério Pereira Simões
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 25 de agosto de 2026.

Prof. Dr. Bruno de Oliveira Costa Couto
Avaliador Interno
IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Alexandre Pereira Chahad
Avaliador Externo
Instituto Federal do Espirito Santo - Campus Cariacica

Prof. Dr. Leandro Rodrigues da Silva Souza
Avaliador Externo
IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida
Avaliador Externo
Instituto Federal do Espirito Santo - Campus Serra

Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Presidente da banca
Instituto Federal do Espirito Santo - Campus Serra

gov.br Documento assinado digitalmente
GUSTAVO MAIA DE ALMEIDA
Data: 27/10/2026 16:17:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

gov.br Documento assinado digitalmente
ALEXANDRE PEREIRA CHAHAD
Data: 27/10/2026 22:39:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geraldo Andrade de Oliveira**, **Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Universidade de Brasília (00038174000143)** , em 23/10/2026 09:34:28.
- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 23/10/2026 16:38:20.
- **Leandro Rodrigues da Silva Souza**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 23/10/2026 17:46:55.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/10/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 870815
Código de Autenticação: bbbe82536f

INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, saúde e perseverança ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço ao meu orientador, Dr. Geraldo Andrade de Oliveira, e a meus coorientadores: Dr. Lucas Peres Angelini e Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior, por suas orientações precisas, paciência e dedicação em cada etapa do processo.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, e a seus dedicados professores, manifesto minha gratidão pela excelência do ensino oferecido, pelo apoio constante e pela oportunidade de crescimento acadêmico.

Aos colegas e amigos do programa de pós-graduação, pelas trocas de ideias, apoio mútuo e momentos de descontração que tornaram essa experiência mais rica e significativa.

À minha família, especialmente aos meus pais Pedro e Terezinha, pelo amor incondicional, apoio e compreensão em todos os momentos e à minha esposa Cintia da Silva Martins, que me apoiou em momentos difíceis de minha vida.

Agradeço também aos meus filhos, que este esforço inspire vocês a sempre acreditarem em seus sonhos, assim como vocês me inspiraram a acreditar nos meus.

E, por fim, a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram, direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Rogério Pereira Simões, nascido em 28 de julho de 1974, em Goiatuba, Goiás. Concluiu o ensino médio em 1994 pelo Colégio Estadual de Goiatuba, concluiu a graduação em Matemática em 2003 pela Universidade Estadual de Goiás, concluiu o curso de pós-graduação *lato sensu* em Matemática Aplicada em 2004 pela Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas de Goiatuba. Atua como servidor público no cargo de professor na rede pública de educação do Estado de Goiás pelo Colégio Estadual Orcalino Fernandes Evangelista.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO..... 17

1.1. JUSTIFICATIVA..... 18

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 19

1.2.1. A CANA DE AÇÚCAR NA ECONOMIA BRASILEIRA..... 19

1.2.2. MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR..... 20

1.2.3. SENSORIAMENTO REMOTO..... 21

1.2.4. SENSORIAMENTO E SUSTENTABILIDADE..... 22

2. OBJETIVOS..... 23

2.1 OBJETIVO GERAL..... 23

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 23

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 24

3. CAPÍTULO 1..... 26

3.1. INTRODUÇÃO..... 29

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS..... 30

3.2.1. CRITÉRIOS DE BUSCA E SELEÇÃO..... 30

3.2.2. ANÁLISE DE DADOS..... 31

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 43

3.3.1. BENEFÍCIOS PARA AGRICULTURA..... 43

3.3.2. AVANÇOS NA APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO 44

3.3.3. INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS..... 44

3.3.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA..... 44

3.3.5. DESAFIOS ENFRENTADOS..... 45

3.3.6. IMPLICAÇÕES PRÁTICAS..... 45

3.4. CONCLUSÕES..... 45

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 47

4. CAPÍTULO 2..... 49

4.1. INTRODUÇÃO..... 52

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS..... 54

4.2.1. ÁREA DE ESTUDO..... 54

4.2.2. AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO..... 55

4.2.3. OBTENÇÃO DE DADOS ESPACIAIS..... 57
4.2.4. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS ESPECTRAIS..... 60
4.2.5. ÍNDICES ESPECTRAIS..... 62
4.2.6. EXTRAÇÃO DE VALORES ESPECTRAIS..... 64
4.2.7. HARMONIZAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES MULTISSENSORES.. 66
4.2.8. SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE TEMPORAL..... 67
4.2.9. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO..... 67
4.2.10. VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO..... 72
4.2.11. ARQUITETURA DO SISTEMA..... 75
4.2.12. ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE E INDICADORES AMBIENTAIS..... 77
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 83
4.3.1. DESENVOLVIMENTO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA..... 83
4.3.2. AQUISIÇÃO MULTISSENSOR E ÍNDICES ESPECTRAIS..... 87
4.3.3. COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DOS ÍNDICES ESPECTRAIS..... 90
4.3.4. PREDIÇÃO DO ATR PELOS ÍNDICES ESPECTRAIS..... 92
4.3.5. DESEMPENHO DO MODELO DE PREDIÇÃO..... 95
4.3.6. APLICABILIDADE OPERACIONAL..... 99
4.3.7. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE..... 101
4.3.8. CONTRIBUIÇÕES AMBIENTAIS E OPERACIONAIS..... 102
4.3.9. ANÁLISE FINANCEIRA DA OTIMIZAÇÃO DA COLHEITA.... 104
4.3.10. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS..... 107
4.4. CONCLUSÕES..... 110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 112
5. CONCLUSÃO GERAL..... 114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de seleção dos artigos da revisão bibliográfica..... 31

Figura 2 - Breve esboço da metodologia..... 32

Figura 3 - Comparação dos mapas de índice de maturidade gerados pelos modelos de regressão linear múltipla, máquina de vetor de suporte e floresta aleatória..... 33

Figura 4 - Comparação dos níveis de saturação dos índices de vegetação NDVI, NDRE1 e CIRE..... 34

Figura 5 – Índices de vegetação (NDVI) da área experimental em diferentes estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar..... 35

Figura 6 – Evolução temporal dos índices de vegetação relacionados ao teor de clorofila na área de estudo..... 36

Figura 7 – Análise do coeficiente de determinação (R^2) da abordagem ODLD-SSCM para os conjuntos de treinamento, teste e dados completos..... 37

Figura 8 - Comparação de área de cana-de-açúcar antes e após a colheita em imagem natural e NDVI..... 38

Figura 9 – Efeito da nebulosidade sobre imagens da área de estudo durante o período de colheita..... 38

Figura 10 – Correlação entre o índice de vegetação GNDVI e o teor de sacarose (Pol) em diferentes variedades de cana-de-açúcar..... 39

Figura 11 - Arquitetura dos modelos de aprendizado de máquina..... 40

Figura 12 – Mapa de cobertura do solo dos estágios de crescimento da cana-de-açúcar processada..... 41

Figura 13 – Comparação entre os rendimentos reais e os estimados pelo modelo de regressão baseado em GNDVI..... 42

Figura 14 - Microcontrolador Uno e sensor de umidade do solo..... 43

Figura 15 – Localização da Fazenda Santa Laura e dos talhões analisados em Vicentinópolis (GO)..... 54

Figura 16 – Imagens orbitais obtidas pelos sensores Sentinel-2 HLS, Landsat-9 HLS e CBERS-4/MUX..... 59

Figura 17 – Imagens orbitais e índices NDVI e GNDVI utilizados no monitoramento multissensor da cana-de-açúcar..... 59

Figura 18 – Fluxo de processamento das **imagens orbitais..... 61**

Figura 19 – Arquitetura funcional do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar..... 75

Figura 20 – Tela principal do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar 84

Figura 21 – Painel de resultados do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar 86

Figura 22 – Evolução temporal dos índices NDVI e GNDVI nos talhões 60, 61 e 62 (2025)..... 91

Figura 23 – Comparação entre o ATR laboratorial e o estimado pelo modelo nos talhões avaliados..... 96

Figura 24 – Distribuição dos erros percentuais absolutos de ATR por talhão..... 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos dados agrícolas da Fazenda Santa Laura no período de 2020 a 2025..... 56

Tabela 2 – Dados agronômicos dos talhões avaliados na safra 2025..... 57

Tabela 3 – Caracterização espacial e temporal dos talhões utilizados na obtenção das imagens orbitais..... 60

Tabela 4 – Comparação da dispersão temporal dos índices NDVI e GNDVI nos talhões avaliados.....68

Tabela 5 – Aquisição multissensor e índices espectrais..... 89

Tabela 6 – Comparação entre os valores de ATR estimados pelo sistema e determinados em campo nos talhões avaliados..... 91

Tabela 7 – Indicadores de desempenho do sistema na estimativa do ATR nos talhões avaliados..... 97

Tabela 8 – Resultado econômico dos talhões em função do ATR obtido na colheita e da referência de cana-padrão..... 105

LISTA DE SIGLAS

ATR	- Açúcar Total Recuperável
CONAB	- Companhia Nacional de Abastecimento
DT	- Dados de Treinamento
ESA	- European Space Agency (Agência Espacial Europeia)
EVI	- Enhanced Vegetation Index (Índice de Vegetação Aprimorado)
GNDVI	- Green Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde)
GPS	- Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
GVI	- Green Vegetation Index (Índice de Vegetação Verde)
HLS	- Harmonized Landsat and Sentinel-2 (Landsat e Sentinel-2 Harmonizados)
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	- Internet of Things (Internet das Coisas)
LiDAR	- Light Detection and Ranging (Detecção e Ranging de Luz / Perfilamento Laser)
MAE	- Mean Absolute Error (Erro Absoluto Médio)
MAPE	- Mean Absolute Percentage Error (Erro Percentual Absoluto Médio)
ML	- Machine Learning
MLR	- Multiple Linear Regression (Regressão Linear Múltipla)
MUX	- Multispectral Camera (Câmera Multiespectral)
NASA	- National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
NDVI	- Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
NDWI	- Normalized Difference Water Index (Índice de Água por

	Diferença Normalizada)
NIR	- Near Infrared (Infravermelho Próximo)
OBIA	- Object-Based Image Analysis (Análise de Imagens Baseada em Objetos)
ODLD-SSCM	- Optimal Deep Learning Driven Smart Sugarcane Crop Monitoring (Monitoramento Inteligente Otimizado de Cana-de-Açúcar Baseado em Aprendizado Profundo)
ODS	- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OSCO	- Oppositional Spider Colony Optimization (Otimização Oposicional por Colônia de Aranhas)
POL	- Polarização (teor aparente de sacarose no caldo de cana-de-açúcar)
R^2	- Coeficiente de Determinação (Métrica Estatística)
RF	- Random Forest (Floresta Aleatória - Algoritmo de Machine Learning)
RMSE	- Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)
SADL	- Self-Attentive Deep Learning (Aprendizado Profundo com Auto-atenção)
SAR	- Synthetic Aperture Radar (Radar de Abertura Sintética)
SAVI	- Soil Adjusted Vegetation Index (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo)
SMARTS	- Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (Modelo Simples de Transferência Radiativa Atmosférica do Brilho Solar)
SR	- Sensoriamento Remoto
SVM	- Support Vector Machine (Máquina de Vetores de Suporte)
TCH	- Tonelada de Cana por Hectare
UNICA	- União da Indústria da Cana-de-Açúcar e Bioenergia
USGS	- United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

RESUMO

A determinação do período adequado de colheita da cana-de-açúcar representa um desafio para o setor sucroenergético, uma vez que a maturação da cultura influencia diretamente a qualidade da matéria-prima, o rendimento industrial e o planejamento das operações agrícolas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema automatizado de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar, utilizando imagens orbitais multiespectrais para acompanhar o desenvolvimento vegetativo, estimar o Açúcar Total Recuperável (ATR) e auxiliar na identificação do período favorável à colheita. A metodologia integrou dados dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX, permitindo a construção de séries temporais dos índices espectrais NDVI e GNDVI. A estimativa do ATR foi realizada por meio de um modelo de regressão linear múltipla baseado em características temporais do GNDVI, considerando a condição espectral da vegetação próxima à colheita e a variação do índice ao longo do período de monitoramento. O desempenho do modelo foi avaliado mediante a comparação entre os valores estimados e os resultados laboratoriais de onze talhões da Fazenda Santa Laura, localizada em Vicentinópolis, Goiás. Os resultados apresentaram erro percentual absoluto médio (MAPE) de 4,53%, erro absoluto médio (MAE) de 5,65 kg ATR t^{-1} e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 6,94 kg ATR t^{-1}, com oito dos onze talhões registrando erros inferiores a 6%. A maior divergência foi observada em um talhão com ocorrência de brotamento antes da colheita, no qual a estimativa apresentou superestimação de 10,67%, evidenciando a influência de alterações fisiológicas sobre a relação entre a resposta espectral e o acúmulo de açúcares nos colmos. A análise demonstrou que a utilização da trajetória temporal do GNDVI permite incorporar informações sobre a dinâmica vegetativa da cultura, embora condições agronômicas específicas possam comprometer a correspondência entre os índices espectrais e o ATR. Conclui-se que o sistema desenvolvido apresenta potencial como ferramenta complementar de apoio ao monitoramento da maturação e ao planejamento da colheita da cana-de-açúcar, contribuindo para a tomada de decisões fundamentadas em informações espaciais e temporais, com perspectivas de aplicação voltadas à eficiência operacional, ao aproveitamento energético da matéria-prima e à sustentabilidade da produção sucroenergética.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; sensoriamento remoto; GNDVI; séries temporais; açúcar total recuperável; eficiência energética.

ABSTRACT

Determining the appropriate harvesting period for sugarcane remains a challenge for the sugar-energy sector, as crop maturation directly influences raw material quality, industrial yield, and agricultural operations planning. In this context, this study aimed to develop an automated system for monitoring sugarcane maturation using multispectral satellite imagery to track vegetative development, estimate Total Recoverable Sugar (TRS), and support the identification of favorable harvesting periods. The methodology integrated data from Sentinel-2, Landsat-9, and CBERS-4/MUX satellites, enabling the construction of temporal series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI). TRS was estimated by a multiple linear regression model based on temporal characteristics of GNDVI, considering the spectral condition of the vegetation near harvest and changes in the index throughout the monitoring period. Model performance was evaluated by comparing estimated values with laboratory measurements obtained from eleven sugarcane fields at Santa Laura Farm, located in Vicentinópolis, Goiás, Brazil. The results showed a mean absolute percentage error (MAPE) of 4.53%, a mean absolute error (MAE) of 5.65 kg TRS t^{-1}, and a root mean square error (RMSE) of 6.94 kg TRS t^{-1}, with eight of the eleven fields exhibiting errors below 6%. The largest discrepancy was observed in a field affected by pre-harvest sprouting, where the model overestimated TRS by 10.67%, highlighting the influence of physiological changes on the relationship between spectral response and sugar accumulation in sugarcane stalks. The analysis demonstrated that incorporating the temporal trajectory of GNDVI provides information on crop vegetative dynamics, although specific agronomic conditions may affect the relationship between spectral indices and TRS. It is concluded that the developed system has potential as a complementary decision-support tool for monitoring sugarcane maturation and planning harvesting operations, contributing to data-driven decision-making based on spatial and temporal information, with potential applications in operational efficiency, energy recovery from agricultural raw materials, and the sustainability of sugarcane production.

Keywords: Sugarcane; remote sensing; GNDVI; time series; total recoverable sugar; energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância socioeconômica para o Brasil e o mundo. Cultivada em mais de 90 países, destaca-se por adaptar-se às mais diversas condições de solo e clima. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 685,86 milhões de toneladas, em uma área de 8673,1 mil hectares (CONAB, 2024). Desse volume, a região Centro-Sul produz 92,3% e a região Norte-Nordeste, 7,7%. Em média 36% de toda cana processada no país é destinada à produçãode açúcar e 65% à fabricação de etanol.

O sistema de produção da cana-de-açúcar, semelhante a outras culturas agrícolas, pode ser afetado por fatores relacionados à planta (cultivares, tipo de ciclo), ao solo (tipo, fertilidade), às práticas culturais (época de plantio, densidade de plantio, rotação de cultura) e, especialmente, às condições climáticas (temperatura, radiação, precipitação) (Bell; Garside, 2005; Bonnet *et al.*, 2006; Gilbert *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2005).

O conhecimento do ciclo da cultura e dos padrões de crescimento e desenvolvimento das plantas é importante para melhor manejá-la, pois toda e qualquer produção vegetal que tenha em vista a máxima produtividade econômica, fundamenta-se na interação de três fatores: a planta, o ambiente de produção e o manejo.

A cultura da cana-de-açúcar apresenta sua maturidade estabelecida no momento de observância de redução do fotoperíodo e da temperatura ambiente, período do ano representado pela transição outono-inverno e inverno-primavera. É nessa época do ano que os produtores utilizam essa fonte de volumoso para o corte diário ou para ensilagem, tendo como padrão para a determinação do ponto de corte, simplesmente o tempo de crescimento da planta, que geralmente é colhida com 12 meses de crescimento vegetativo.

A qualidade da cana-de-açúcar é medida pelo teor de sacarose, que depende do estado de maturação, do estado sanitário e das condições de conservação dos colmos. Durante a maturação da cana, a sacarose aumenta até atingir limites extremos de 12 a 18%, ao passo que os outros açúcares, glicose e frutose, diminuem até limites de 0,2%. O momento ideal para iniciar a colheita da cana-de-açúcar é quando a planta está com a maior concentração de açúcares (sacarose, glicose e frutose) e colheitas realizadas antes ou depois destes períodos comprometem a produção.

Tradicionalmente, a avaliação da maturidade da cana-de-açúcar é realizada através de métodos diretos, utilizando aparelhos conhecidos como refratômetros que fazem a leitura de graus brix (sólidos solúveis totais) em diferentes pontos da planta ou através de análises laboratoriais, métodos que apresentam limitações operacionais, elevado custo e restrita representatividade espacial além de demandarem tempo, deslocamento de equipes, impactando a eficiência energética e a sustentabilidade do setor do sistema produtivo.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital tem se consolidado como uma ferramenta eficaz para o monitoramento agrícola, permitindo a análise espacial contínua do desenvolvimento das culturas de forma não destrutiva. O uso de imagens de satélite associadas a índices espectrais de vegetação possibilita acompanhar o comportamento fisiológico da cana-de-açúcar ao longo do ciclo produtivo, contribuindo para decisões mais precisas relacionadas ao manejo e à colheita.

Entretanto, grande parte dos estudos existentes concentra-se na identificação do estado vegetativo ou da maturação em um dado momento, sem integrar de forma sistemática a predição do período ótimo de colheita e a avaliação econômica da produção. A ausência dessa integração limita a aplicação operacional dessas técnicas como ferramentas efetivas de apoio à decisão no setor sucroenergético.

Diante desse cenário, este trabalho propõe uma abordagem integrada para a determinação do estado de maturação da cana-de-açúcar, a predição do melhor momento para a colheita e a estimativa do valor econômico da produção, utilizando imagens de satélite e índices espectrais de vegetação. A proposta visa ampliar o uso do sensoriamento remoto para além do monitoramento fisiológico, incorporando critérios técnicos, energéticos, econômicos e sustentáveis ao processo decisório, contribuindo para o uso racional dos recursos.

1.1. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por eficiência produtiva, redução de custos operacionais e mitigação de impactos ambientais no setor sucroenergético exige o desenvolvimento de ferramentas que permitam otimizar o manejo agrícola e o planejamento da colheita. A definição inadequada do momento de colheita pode resultar em perdas de ATR, menor rendimento industrial e desperdício do potencial energético da biomassa.

A utilização de imagens de satélite como base para a determinação do ponto de maturação e da janela ótima de colheita apresenta-se como uma alternativa sustentável, uma vez que pode reduzir a necessidade de deslocamentos em campo e o uso intensivo de máquinas. Além disso, a integração de dados fisiológicos e econômicos permite que decisões sejam tomadas com base não apenas no estado da cultura, mas também no retorno financeiro esperado.

Assim, a proposta deste trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolver um sistema automatizado, reprodutível e de baixo custo, capaz de apoiar decisões técnicas e econômicas no cultivo da cana-de-açúcar, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética e a viabilidade econômica da produção.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2.1. A CANA-DE-AÇÚCAR NA ECONOMIA BRASILEIRA

A cana-de-açúcar desempenha papel central no cenário agrícola e energético brasileiro, representando um dos pilares da economia nacional. Historicamente, essa cultura foi introduzida no Brasil durante o período colonial e, desde então, evoluiu significativamente, acompanhando os avanços tecnológicos e as mudanças nas demandas do mercado. Atualmente, o país destaca-se como o maior produtor mundial, com dados recentes apontando para volumes expressivos na safra 2024/2025 (CONAB, 2024).

Além da tradicional produção de açúcar, a cana-de-açúcar tem se diversificado na obtenção de etanol, biocombustíveis de segunda geração, bioeletricidade e até mesmo bioplásticos. Essa ampliação no portfólio de produtos não apenas agrega valor à cadeia produtiva, mas também reforça a importância da cultura no contexto da sustentabilidade e da transição energética. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2024), as inovações tecnológicas implementadas ao longo dos últimos anos têm impulsionado essa diversificação, permitindo melhor utilização dos subprodutos e redução no impacto ambiental.

A modernização do setor também é evidenciada pela incorporação de novas tecnologias no monitoramento e manejo da lavoura. O uso de sensoriamento remoto, por exemplo, possibilita o acompanhamento do desenvolvimento da cultura ao longo do tempo, auxilia na tomada de decisões estratégicas para o manejo e colheita. A agricultura

está se movendo para uma área de operações combinadas, e um ajuste de uma prática faz a diferença no rendimento da colheita e, por esse motivo, o gerenciamento agrícola pode influenciar o comportamento da colheita (Leandro *et al.*, 2024).

Em síntese, o cenário atual da cana-de-açúcar no Brasil é marcado por uma forte tradição agrícola aliada à inovação tecnológica. Essa combinação tem permitido que o setor se adapte aos desafios contemporâneos, como as exigências por práticas sustentáveis e a necessidade de diversificação dos produtos. Assim, a cultura não apenas mantém sua relevância econômica, mas posiciona-se como protagonista na busca por alternativas energéticas e no fortalecimento da matriz agrícola brasileira.

1.2.2. MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A maturação da cana-de-açúcar é um processo fisiológico fundamental que determina a qualidade dos produtos, como o açúcar e o etanol. Durante esse período, a planta converte energia fotossintética em açúcares, acumulando sacarose nos colmos, o que define o ponto ideal para a colheita. A produtividade econômica da cana-de-açúcar é determinada pelo acúmulo de sacarose nos colmos (Soares, 2013), e a determinação precisa desse estágio é essencial para maximizar a eficiência produtiva e reduzir perdas, impactando diretamente a competitividade do setor sucroalcooleiro. O índice de maturação é a redução do crescimento vegetativo e acúmulo de sacarose no colmo, ou seja, mais sacarose e menos açúcares redutores (Santos *et al.*, 2010).

Tradicionalmente, a avaliação da maturação é realizada por meio de análises laboratoriais, como a medição dos graus Brix, que indicam a concentração de sólidos solúveis no caldo da cana. Contudo, esses métodos podem ser lentos, onerosos e suscetíveis à variabilidade amostral.

Atualmente, as tecnologias de sensoriamento remoto têm se destacado como alternativa promissora para o monitoramento contínuo da maturação da cana-de-açúcar. O uso de imagens multiespectrais, obtidas via satélite, permite a extração de índices de vegetação, como o NDVI e o GNDVI, que refletem alterações fisiológicas na planta. Esses índices possibilitam identificar variações no acúmulo de sacarose e na saúde do cultivo, permitindo intervenções mais precisas e oportunas (CONAB, 2024).

Além disso, a integração de dados de sensoriamento remoto com técnicas de análise estatística e algoritmos de machine learning tem potencializado a capacidade de

prever o ponto ótimo de colheita. Essa abordagem inovadora contribui para a melhor gestão dos recursos, redução dos custos operacionais e o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas às exigências de um mercado cada vez mais competitivo e à necessidade de minimizar os impactos ambientais (UNICA, 2024; Torres, 2024).

Dessa forma, o emprego dessas tecnologias emergentes não só aprimora a precisão na avaliação da maturação, mas também promove a sustentabilidade e a eficiência na produção, oferecendo aos produtores ferramentas essenciais para otimizar a colheita e, consequentemente, elevar a qualidade dos produtos derivados da cana-de-açúcar.

1.2.3. SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a aquisição e a análise de dados sobre a superfície terrestre sem a necessidade de contato físico, utilizando sensores instalados em satélites, aeronaves ou drones. Essa técnica tem se mostrado fundamental para diversas aplicações, como o monitoramento ambiental, a agricultura de precisão, o planejamento urbano e a gestão de recursos naturais.

Ao captar a radiação refletida ou emitida pelos objetos, os sensores convertem essa informação em imagens multiespectrais ou hiperespectrais. Essas imagens possibilitam a extração de índices, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que são essenciais para a avaliação do vigor e da saúde da vegetação. Recentemente, a integração de técnicas de *machine learning* e inteligência artificial aos dados de sensoriamento remoto têem potencializado a capacidade de análise, proporcionando modelos preditivos mais precisos e eficientes (Li; Zhou, 2021).

Na área agrícola, por exemplo, o sensoriamento remoto viabiliza o monitoramento contínuo do estado das culturas, permitindo a detecção precoce de deficiências nutricionais e o gerenciamento mais assertivo do uso de insumos. Dessa forma, é possível aumentar a produtividade e promover práticas mais sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental decorrente do uso excessivo de fertilizantes e pesticidas (Zhang *et al.*, 2022).

Além disso, essa tecnologia desempenha papel crucial no monitoramento ambiental, contribuindo para a identificação de desmatamentos, avaliação da qualidade

da água e acompanhamento dos efeitos das mudanças climáticas. A análise temporal das imagens possibilita a observação de tendências e a mensuração dos impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas, fornecendo informações valiosas para a formulação de políticas públicas e estratégias de conservação (Guanter, Schaepman & Schaepman-Strub, 2020).

Em suma, o sensoriamento remoto é uma ferramenta em constante evolução, impulsionada pelo desenvolvimento de sensores de alta resolução e pela incorporação de algoritmos avançados de análise de dados. Seu uso ampliado e a crescente integração com outras tecnologias tornam-no indispensável para enfrentar os desafios atuais de monitoramento ambiental e de gestão sustentável dos recursos naturais.

1.2.4. SENSORIAMENTO E SUSTENTABILIDADE

O sensoriamento remoto tem se consolidado como ferramenta estratégica para o monitoramento ambiental e o desenvolvimento sustentável. Por meio de sensores instalados em satélites, aeronaves ou drones, é possível coletar dados precisos sobre a superfície terrestre, sem a necessidade de contato direto com o local monitorado. Essa tecnologia permite a aquisição de imagens multiespectrais e hiperespectrais, e, quando processadas, fornecem informações essenciais para a avaliação de mudanças ambientais, o uso do solo, a cobertura vegetal e a qualidade dos recursos hídricos.

A integração de técnicas avançadas de processamento de dados e algoritmos de inteligência artificial têem potencializado as aplicações do sensoriamento remoto. Em contextos de sustentabilidade, essa tecnologia viabiliza o monitoramento contínuo de áreas de desmatamento, a detecção de degradação de ecossistemas e a análise dos impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente. Tais informações são fundamentais para a formulação de políticas públicas e para a implementação de estratégias de conservação dos recursos naturais.

No setor agrícola, o sensoriamento remoto tem sido um aliado na promoção da agricultura de precisão, permitindo a identificação de áreas que necessitam de manejo diferenciado, a otimização do uso de insumos como água e fertilizantes e a redução de perdas decorrentes de práticas inadequadas. O sensoriamento remoto tem inúmeras aplicações na agricultura, revolucionando a maneira como os agricultores administram

suas plantações, otimizam o uso de recursos e monitoram as condições ambientais (Yadav *et al.*, 2024).

Além disso, a tecnologia contribui significativamente para a gestão integrada de recursos naturais em áreas urbanas e rurais. A análise temporal das imagens permite o acompanhamento de mudanças na cobertura vegetal, na qualidade do ar e na expansão urbana, possibilitando a identificação de áreas críticas e a implementação de medidas preventivas para a mitigação de riscos ambientais (Zhang *et al.*, 2022).

Em síntese, o sensoriamento remoto é uma ferramenta indispensável para a promoção da sustentabilidade. Ao oferecer dados atualizados e de alta resolução, ele suporta a tomada de decisões estratégicas em diversas áreas, desde a conservação ambiental até a otimização da produção agrícola. A integração da agricultura de precisão com tecnologias de sensoriamento remoto marca avanço significativo nas práticas agrícolas modernas, oferecendo níveis sem precedentes de precisão, eficiência e sustentabilidade (Yadav *et al.*, 2024).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema automatizado baseado em imagens de satélite para a determinação do estado de maturação da cana-de-açúcar, a predição do melhor momento de colheita e a estimativa do valor econômico da produção, visando apoiar a tomada de decisão no setor sucroenergético, promovendo práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o estado de maturação da cana-de-açúcar a partir dos índices espectrais NDVI e GNDVI obtidos de imagens de satélite;
- Integrar dados provenientes de múltiplos sensores orbitais, garantindo maior continuidade das séries temporais;

- Analisar a série temporal dos índices NDVI e GNDVI para predição do período de colheita;
- Estimar o ATR da cana-de-açúcar com base em índices espectrais de vegetação e calcular o valor econômico estimado por tonelada de cana;
- Desenvolver um sistema automatizado de apoio à decisão agrícola com interface amigável ao usuário;
- Avaliar as contribuições do sistema para a sustentabilidade e a eficiência energética do sistema produtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONNET, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects o f high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. Australian Journal of Agricultural Research ,Victoria, v. 57, 1087-1095 p. , 2006

CÂMARA, G.M.S Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S Produção da cana-de-açúcar. ESALQ: Piracicaba, 1993.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Safra 2024/2025. Primeiro Levantamento (abril/2024). Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: julho, 2024.

CRÓSTA, A. P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, SP: Instituto de Geociências/UNICAMP, 1992.

EPIHANIO, J.C.N.; LUIZ, A.J.B.; FORMAGGIO, A. R. Estimativa de áreas agrícolas municipais, utilizando sistema de amostragem simples sobre imagens de satélite. Bragantia, Campinas, v. 61, n. 2, 2002.

GUANTER, L., SCHAEPMAN, M. E., & SCHAEPMAN-STRUB, G. Advances in remote sensing data and techniques for environmental monitoring. International Journal of Remote Sensing,, 1125-1150 p, 2020.

LEANDRO, E.R.; HEENKENDA, M.K.; ROMERO, K.F. Estimating Sugarcane Maturity Using High Spatial Resolution Remote Sensing Images. Crops, Vol. 4, p. 333–347, 2024. https://doi.org/10.3390/crops4030024. Acesso em: 10 out. 2024.

Li, X., & Zhou, Y.. Machine learning in remote sensing: A comprehensive review., 4230-4247 p, 2021.

NOVO, E.M.L.M. 1992. Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações. São Paulo: Edgar Blucher Ltda.

SANTOS, F. *et al.* Cana-de-açúcar: biomassa, açúcar e álcool – tecnologia e perspectivas. Viçosa – MG [s.n.], 575 p. , 2010.

SOARES, J.S.M. Caracterização estrutural e funcional da proteína udp-glucose pirofosforilase envolvida na biossíntese e acúmulo de sacarose em cana de açúcar. 2013, 112 p. Tese (Doutorado em Biologia). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

TORRES, A. Etanol coloca Brasil na liderança da transição energética. Goiânia – Goiás, 2024. Disponível em:<:// https://www.canalbioenergia.com.br/etanol-coloca-brasil-na-lideranca-da-transicao-energetica//>. Acesso em: julho de 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. Safra 2024/2025. Histórico de Produção e Moagem. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em: julho, 2024

YADAV, A; YADAV, D.K. . Precision Agriculture and Remote Sensing Technologies, 105-122 p., 2024.

ZHANG, Lefei; ZHANG, Liangpei. Artificial Intelligence for Remote Sensing Data Analysis: A review of challenges and opportunities, in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 10, no. 2, pp. 270-294, 2022.

3. CAPÍTULO 1

PROMESSAS E DESAFIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO POR SATÉLITES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA PESQUISA

RESUMO

Nos últimos anos, vários estudos foram publicados explorando a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto por satélites na cultura da cana-de-açúcar com o objetivo de otimizar a produção, monitorar as condições hídricas e prever a qualidade da matéria-prima, contribuindo para um manejo eficiente, sustentável e lucrativo. O sensoriamento remoto, com base em estudos e revisões atuais, surge como alternativa promissora, fornecendo dados espaciais e temporais que aliados a técnicas eficientes de análise de dados e aprendizado de máquina (ML) contribuem para determinação mais precisa do ponto de maturação, sugerindo um momento ideal para a colheita. Este estudo fornece a visão geral da pesquisa sobre a utilização de sensoriamento remoto por satélites no cultivo de cana-de-açúcar discutindo os avanços e desafios das abordagens, descrevendo, também, a confiabilidade dos dados fornecidos pelos satélites Landsat e Sentinel-2 que permitem monitoramento econômico de vários fatores no cultivo da cana-de-açúcar, principalmente os relacionados à maturação, fornecendo informações espectrais e multitemporais bastante precisas, permitindo abordagens poderosas de aprendizado de máquina (ML) como o algoritmo de floresta aleatória (RF) para determinação eficiente do crescimento, saúde e rendimento da cana-de-açúcar.

Palavras-Chave: Cana-de-açúcar; Índice de Maturidade; Sensoriamento Remoto por Satélite

ABSTRACT

In recent years, several studies have been published exploring the satellite remote sensing techniques application in sugarcane cultivation with the aim of optimizing production, monitoring water conditions and predicting the quality of raw material contributing to efficient, sustainable and profitable management. Remote sensing, based on current studies and reviews, emerges as a promising alternative, providing spatial and temporal data that, combined with efficient data analysis and machine learning (ML) techniques, contribute to a more accurate determination of the maturity point, suggesting an ideal time for harvesting. This study provides an overview of the research about the use of satellite remote sensing in sugarcane cultivation, discussing the advances and challenges of the approaches, also describing the reliability of the data provided by the Landsat and Sentinel-2 satellites that allow cost-effective monitoring of several factors in sugarcane cultivation, mainly those related to maturity, providing very accurate spectral and multitemporal information, allowing powerful machine learning (ML) approaches such as the random forest (RF) algorithm for efficient determination of sugarcane growth, health and yield.

Keywords: Sugarcane; Maturity Index; Satellite Remote Sensing

3.1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (Saccharum spp.) é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, desempenhando papel estratégico na economia nacional devido à relevância para os setores sucroenergético e alimentício. O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com 685,86 milhões de toneladas, em uma área de 8673,1 mil hectares (CONAB, 2024). Além de impulsionar a balança comercial, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar gera milhões de empregos diretos e indiretos, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões.

Dado o tamanho e a importância dessa cultura, a qualidade da matéria-prima é fator primordial para o aumento da produção. No entanto, a otimização da produção e a garantia da qualidade da matéria-prima representam desafios constantes para o setor sucroenergético (Dimov *et al.*, 2022). Nesse contexto, a determinação precisa do índice de maturação e a identificação do momento ideal para a colheita são etapas fundamentais para maximizar o rendimento e a qualidade do produto (Velázquez *et al.*, 2023). Tradicionalmente, esse processo é realizado por meio de amostragens em campo e análises laboratoriais, métodos que, embora eficazes, são custosos, demorados e sujeitos a variações espaciais significativas, mostrando-se limitados em termos de escala e representatividade espacial (Leandro *et al.*, 2024).

Em contrapartida, o sensoriamento remoto (SR) emerge como uma ferramenta promissora, oferecendo dados espaciais e temporais detalhados sobre as lavouras (Kharamov *et al.*, 2020). A combinação estratégica do SR com técnicas de aprendizado de máquina (ML) permite o desenvolvimento de modelos preditivos robustos, capazes de estimar o índice de maturação e identificar o momento ótimo para a colheita com maior precisão e eficiência (Liaghat *et al.*, 2019).

A aplicação de imagens de satélite na agricultura de precisão permite estimar variáveis biofísicas da cultura, como teor de clorofila, teor de biomassa e índice de área foliar, que estão diretamente relacionadas ao acúmulo de sacarose nos colmos. Métodos baseados em índices de vegetação, como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o EVI (Índice de Vegetação Aprimorado), têm sido amplamente utilizados para avaliar a maturação da cana, permitindo que produtores e indústrias tomem decisões estratégicas sobre o momento ideal da colheita.

Este artigo de revisão tem como objetivo explorar o potencial transformador do SR e do ML na cultura da cana-de-açúcar, com foco na otimização do índice de maturação

e na determinação do momento ideal para a colheita. Foram abordados os principais índices de vegetação utilizados, as metodologias de modelagem da maturação com ML, o uso de indutores de maturação e o monitoramento temporal da qualidade da cana-de-açúcar, visando fornecer aos produtores e pesquisadores uma visão abrangente das ferramentas e técnicas disponíveis para aprimorar a gestão da cultura e garantir o atendimento da crescente demanda global por açúcar e bioenergia (Barbosa Júnior, et al, 2024).

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. CRITÉRIOS DE BUSCA E SELEÇÃO

Em revisões de pesquisas, vários métodos são utilizados para a seleção das fontes de estudo que serão analisadas. Para esta revisão, foram selecionados artigos em inglês sobre fenologia, evapotranspiração e maturação da cana-de-açúcar, bem como artigos que discorrem do uso de sensoriamento remoto por satélite, aprendizado de máquina (ML), imagens multiespectrais e termográficas e tratamento de dados.

A plataforma escolhida com banco de dados de periódicos publicados sobre o assunto foi a ScienceDirect utilizando palavras-chave como: "*satellite remote sensing of sugarcane*", "*sugarcane and ML*" e "*determination of the sugarcane maturity index*".

Na primeira busca efetuada, foram encontrados 1595 resultados. Em seguida a busca foi refinada para artigos publicados nos últimos 6 anos sendo encontrados 907 resultados. Um filtro para seleção de artigos científicos de pesquisa foi marcado encontrando 644 resultados. Finalmente a busca foi refinada com o título da publicação "*remote sensing applications: Society and environments*" resultando 30 artigos. Desse conjunto, 12 artigos foram selecionados pelo critério de relevância e adequados para a inclusão neste estudo. A Figura 1 demonstra um diagrama do processo de busca e seleção dos artigos para a revisão bibliográfica deste estudo.

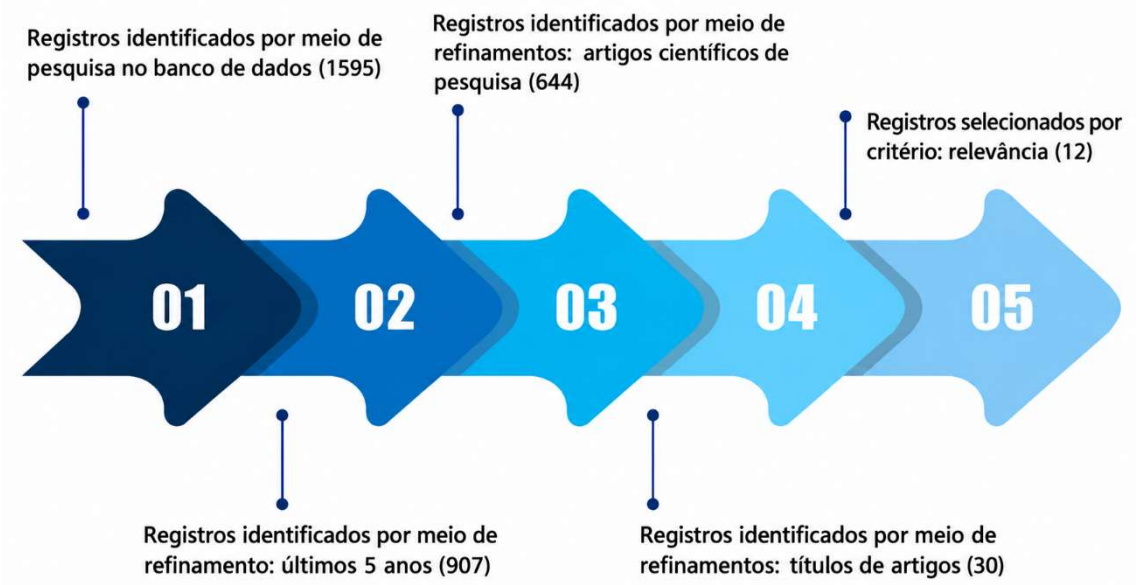

Figura 1 – Processo de seleção dos artigos da revisão bibliográfica. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2.2 – ANÁLISE DE DADOS

Analisando qualitativamente o conteúdo dos 12 artigos selecionados no estudo várias vantagens e desafios são identificados para a determinação da maturação da cana-de-açúcar por meios remotos utilizando imagens espectrais obtidas de satélites.

No primeiro artigo analisado de Chaudhari *et al.* (2023) há uma discussão sobre a previsão de rendimento da cana-de-açúcar utilizando a combinação de dados de sensoriamento remoto óptico e de radar de abertura sintética (SAR), e o objetivo principal é melhorar a precisão das estimativas de biomassa e rendimento da cana-de-açúcar. O estudo integrou dados do Sentinel-1 (SAR) e Sentinel-2 (óptico) para modelagem usando vários algoritmos de aprendizado de máquina, incluindo técnicas de ensemble como *bagging* e *boosting*. A fusão de dados ópticos e SAR melhorou a precisão das previsões, com a modelagem explicando 63-70% da variação na biomassa durante o treinamento e 44-60% nos testes. A Figura 2 sintetiza as etapas deste processo.

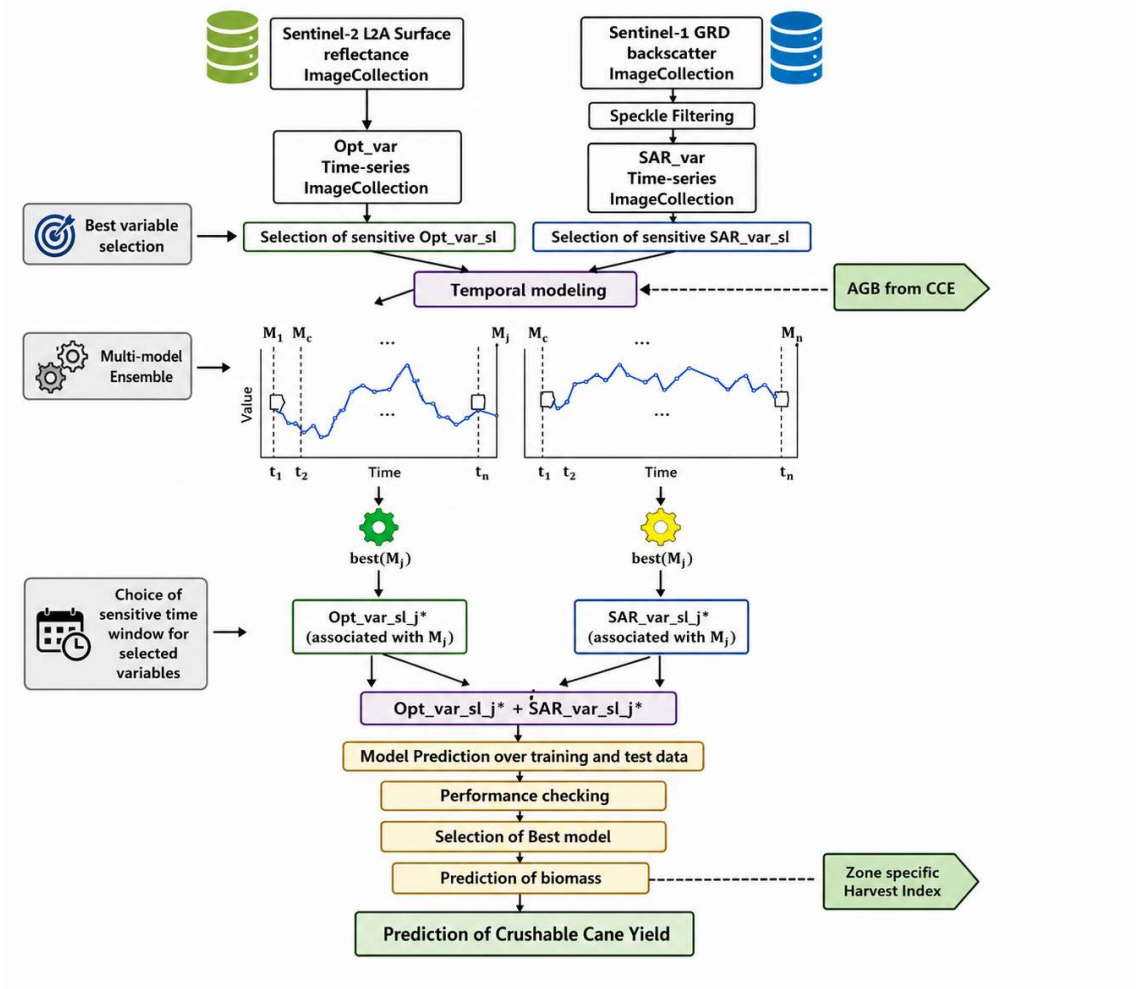

Figura. 2 - Breve esboço da metodologia. Fonte: Adaptado de Chaudhari *et al.* (2024).

Numa outra abordagem Leandro *et al.* (2024) discute o uso de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial para estimar a maturidade da cana-de-açúcar. A pesquisa teve como objetivo desenvolver um método mais eficiente e econômico para monitorar a maturidade da cana durante seu ciclo de crescimento, especialmente por causa dos impactos das mudanças climáticas. O estudo utilizou imagens capturadas por drones equipados com uma câmera multiespectral. Foram coletadas amostras de campo para medir valores de Brix e pol. Índices de vegetação como NDWI, GNDVI e a banda verde foram selecionados com base na correlação com as amostras de campo. Três modelos de regressão foram empregados: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) e uma regressão linear múltipla. O modelo RF apresentou o melhor desempenho em termos de precisão e acurácia. A análise indicou que a área de estudo ainda não havia atingido a maturidade ideal para a colheita. O método desenvolvido é eficaz para o monitoramento temporal das culturas e otimiza o tempo de colheita. A Figura 3 demonstra visualmente as diferenças de cada processo.

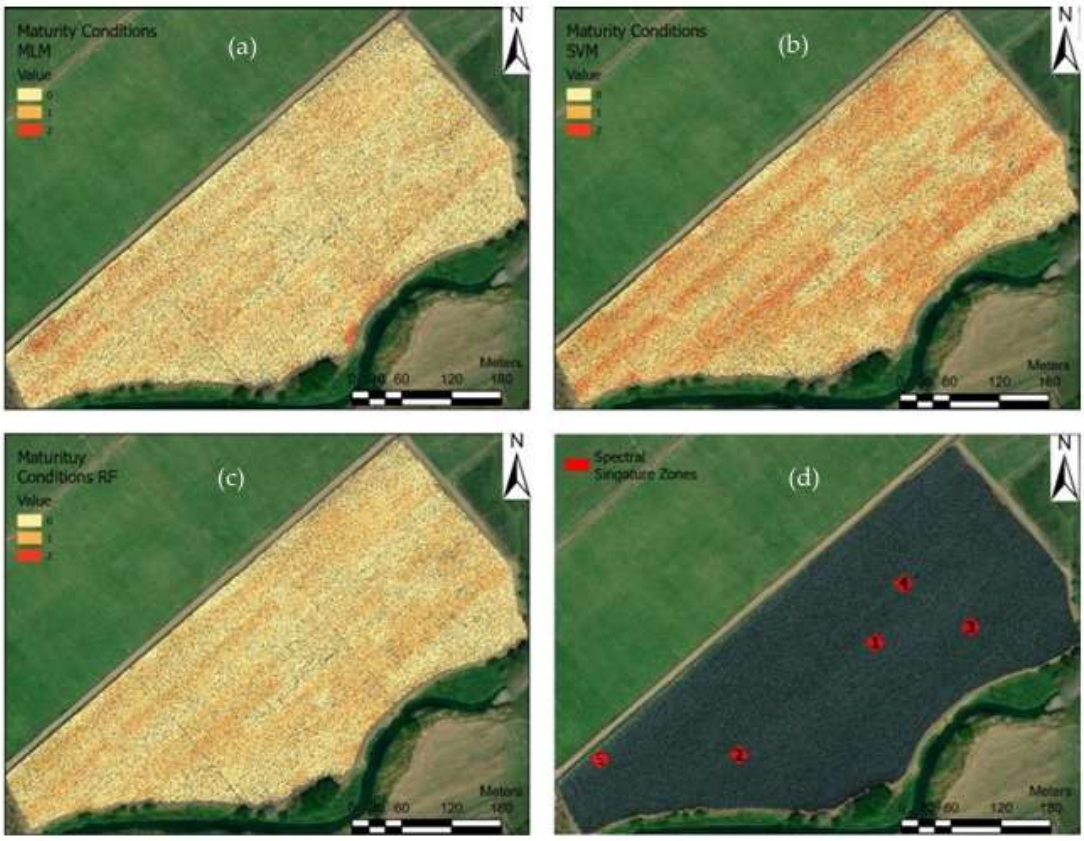

Figura 3 - Comparação dos mapas de índice de maturidade gerados pelos modelos de regressão linear múltipla, máquina de vetor de suporte e floresta aleatória. Fonte: Adaptado de Leandro *et al.* (2024).

Dimov *et al.* (2022) abordam o uso de séries temporais de sensoriamento remoto e métricas de fenologia para estimar a produtividade da cana-de-açúcar. O objetivo de estimar a produtividade da cana-de-açúcar é implementar estratégias de otimização, facilitar o planejamento da logística de colheita, verificar a confiabilidade das estimativas de pré-colheita e otimizar o preço da commodity de acordo com a disponibilidade. O estudo compara três conjuntos de variáveis preditoras: séries temporais de índices de vegetação, métricas fenológicas e variáveis espaço-temporais. Utiliza modelos de regressão, incluindo Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM). O modelo RF apresentou os melhores resultados, alcançando coeficientes de determinação (R^2) de até 0,84 para a estimativa de rendimento e 0,82 para a quantidade de açúcar. As métricas fenológicas mostraram-se particularmente eficazes e poderiam ser úteis para a transferência de modelos. A Figura 4 apresenta a comparação dos níveis de saturação de cada índice.

Figura 4 - Comparação dos níveis de saturação dos índices de vegetação NDVI, NDRE1 e CIRE. Fonte: Adaptado de Dimov *et al.* (2022).

Outro aspecto, muito importante, abordado em Silveira *et al.* (2020) é o uso de imagens multiespectrais e termográficas para monitorar as condições hídricas da cana-de-açúcar, enfatizando a importância da irrigação na produtividade da cultura. As imagens termográficas têm potencial para avaliação rápida, não destrutiva e eficiente do estado hídrico das plantas de cana-de-açúcar.

O sensoriamento remoto pode ser usado para estimar a biomassa e a produtividade da cultura, monitorar o estresse hídrico e o vigor das plantas e avaliar o estádio fenológico. As imagens termográficas podem expressar alterações no estado hídrico mais precocemente do que os dados de NDVI obtidos por imagens multiespectrais. Foram utilizados drones equipados com câmeras multiespectrais e termográficas para capturar imagens da área de cultivo irrigada e não irrigada. As imagens foram processadas para gerar mapas de temperatura e índices de vegetação, como o NDVI. As análises mostraram diferenças significativas entre as áreas irrigadas e não irrigadas.

As imagens termográficas, demonstradas na Figura 5, identificaram temperaturas mais baixas nas áreas irrigadas, indicando melhor estado hídrico. O NDVI também evidenciou maior vigor nas plantas irrigadas.

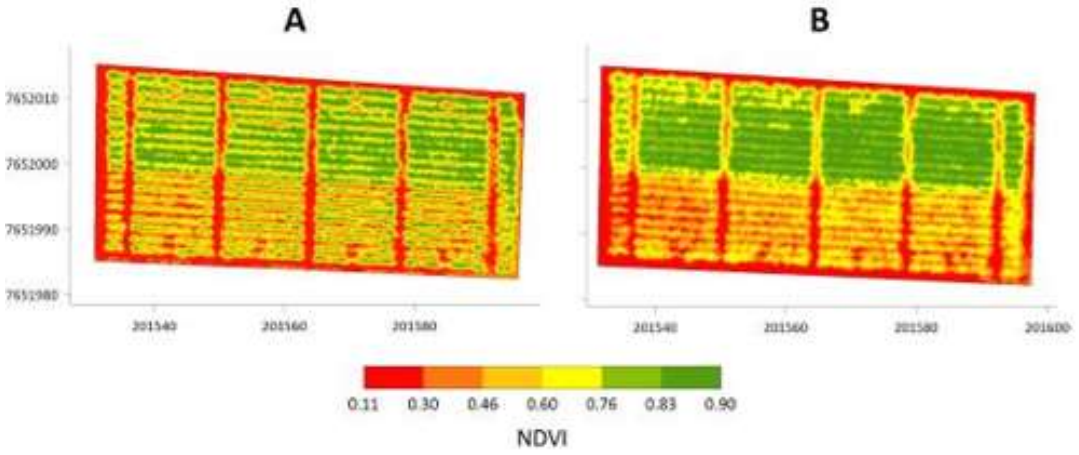

Figura 5 – Índices de vegetação (NDVI) da área experimental em diferentes estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Silveira *et al.* (2020).

O uso de aprendizado de máquina e sensoriamento remoto para monitorar a maturação da cana-de-açúcar é abordado em Velázquez *et al.* (2023). Métodos destrutivos e análises de laboratório são normalmente usados para prever a qualidade do suco da cana, e o sensoriamento remoto é uma fonte potencial de dados para monitorar as colheitas, fornecendo informações espaciais e temporais. Os algoritmos de aprendizado de máquina, como florestas aleatórias (RF), máquinas de vetores de suporte (SVM) e regressão linear múltipla (MLR), podem ser usados para estimar os parâmetros de qualidade do suco de cana-de-açúcar. As imagens multiespectrais do Sentinel-2 permitiram estimar todos os índices de vegetação em estudo com resolução espacial de 10 m. Imagens do Sentinel-2 foram processadas para calcular índices de vegetação como NDVI, SAVI e GNDVI. Medidas de qualidade do suco foram coletadas mensalmente em parcelas experimentais. Foram encontradas correlações significativas (>0,70) entre os índices de vegetação e os parâmetros de qualidade do suco. O modelo de aprendizado de máquina Random Forest apresentou o melhor desempenho na previsão dos parâmetros de qualidade em comparação com outros modelos. A Figura 6 demonstra a evolução temporal dos índices em relação ao teor de clorofila.

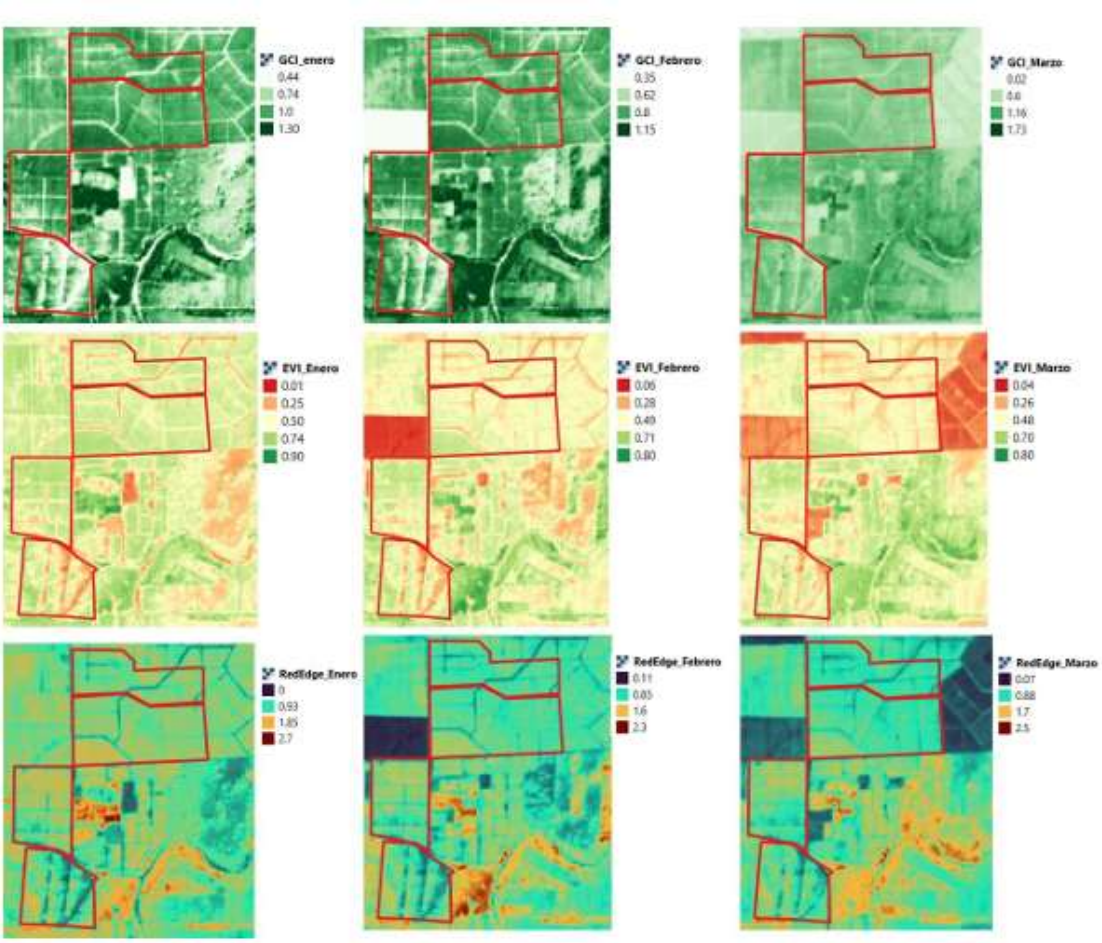

Figura 6 – Evolução temporal dos índices de vegetação relacionados ao teor de clorofila na área de estudo. Fonte: Adaptado de Velázquez *et al.* (2023).

Shakir (2023) concentra suas pesquisas no desenvolvimento de um modelo otimizado de monitoramento da cultura da cana-de-açúcar utilizando aprendizado profundo e imagens de sensoriamento remoto. O objetivo é melhorar a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar por meio da análise de dados obtidos de satélites, como o Sentinel-2. O estudo propõe o modelo ODLD-SSCM (Optimal Deep Learning Driven Smart Sugarcane Crop Monitoring), que utiliza um modelo de aprendizado profundo com autoatenção (SADL) e um algoritmo de otimização (OSCO) para ajuste de hiperparâmetros. O modelo visa mapear o rendimento da cana-de-açúcar a partir de imagens de sensoriamento remoto. O modelo ODLD-SSCM alcançou coeficientes de determinação (R^2) de até 0,84 e erros quadráticos médios (RMSE) reduzidos, demonstrando eficácia na previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Comparações com outros métodos mostraram que o ODLD-SSCM teve desempenho superior, conforme apresentado na Figura 7.

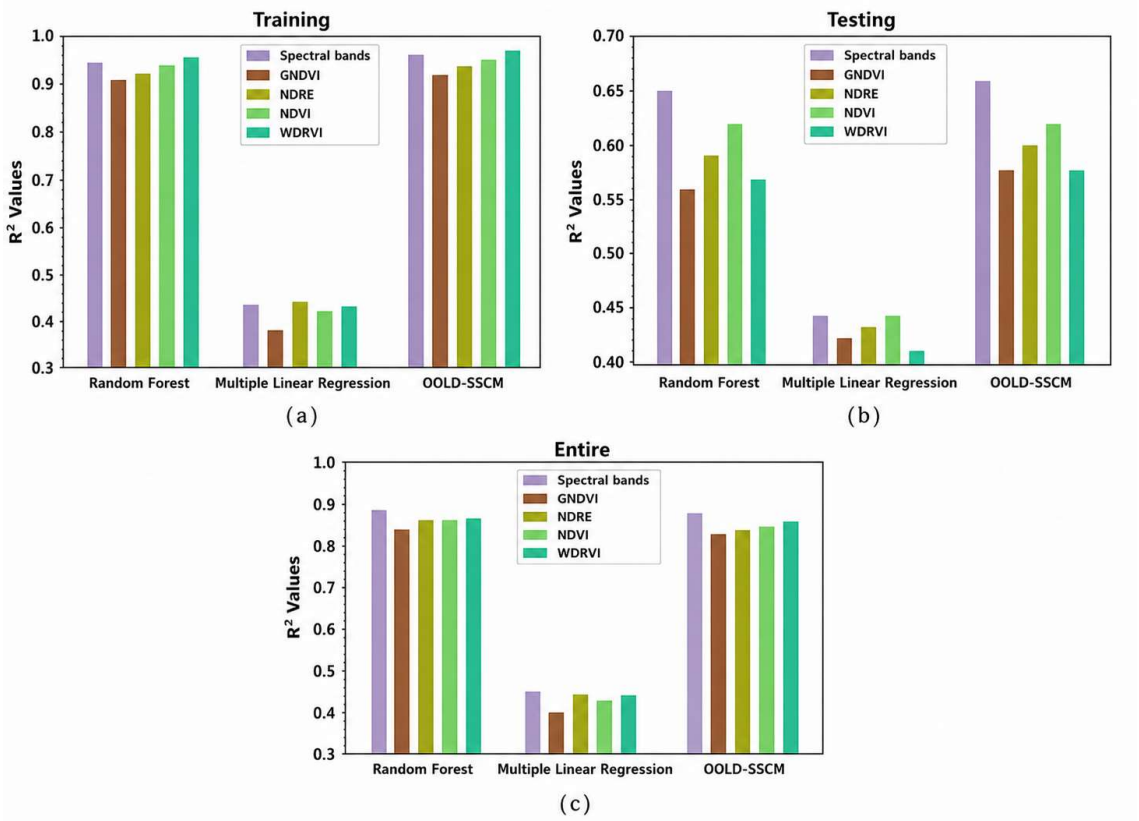

Figura 7 – Análise do coeficiente de determinação (R^2) da abordagem ODLD-SSCM para os conjuntos de treinamento, teste e dados completos. Fonte: Adaptado de Shakir (2023).

Khramov *et al.* (2020) discutem o uso de dados ópticos e SAR para monitorar a colheita de cana-de-açúcar no Brasil. Seu estudo apresenta algoritmos para determinar as datas de colheita da cana-de-açúcar, utilizando dados públicos de radar de abertura sintética (SAR) e satélites ópticos, como o Sentinel-1 e o Sentinel-2. O primeiro algoritmo utiliza a série temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do Sentinel-2. Uma queda acentuada no NDVI indica a colheita, enquanto o segundo algoritmo, baseado em séries temporais de coerência do Sentinel-1, identifica períodos de baixa coerência que correspondem à colheita. Os resultados foram satisfatórios, tendo o algoritmo baseado em dados ópticos uma taxa de coincidência de 97% com a interpretação visual das datas de colheita, enquanto o algoritmo que combina dados SAR e ópticos 90%. A Figura 8 demonstra imagens de satélite antes e após a colheita e a comparação dos índices nestas etapas.

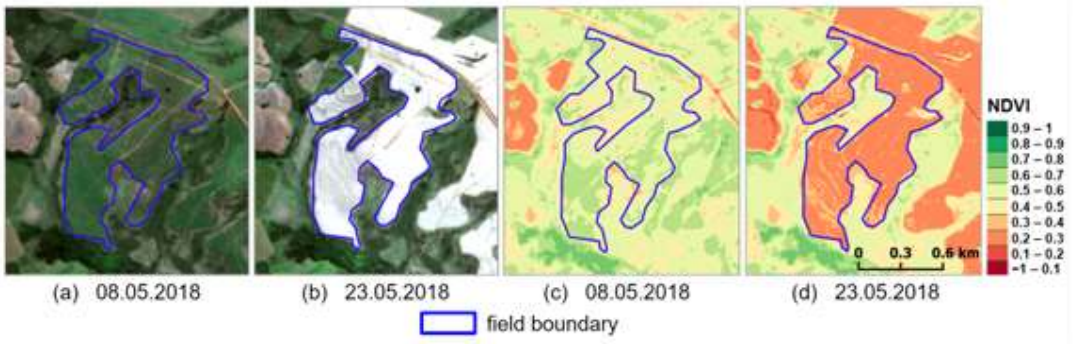

Figura 8 - Comparação de área de cana-de-açúcar antes e após a colheita em imagem natural e NDVI. Fonte: Adaptado de Khramov *et al.* (2020).

A presença de nuvens e a variação nas condições climáticas dificultam a precisão das medições. O uso combinado de dados ópticos e SAR melhora a identificação das datas de colheita, especialmente em períodos de alta nebulosidade. Os algoritmos podem ser utilizados para monitorar operações de colheita, estimar áreas colhidas e contribuir para a previsão de produtividade no setor sucroalcooleiro. A Figura 9 demonstra imagens de satélite com a presença de nuvens.

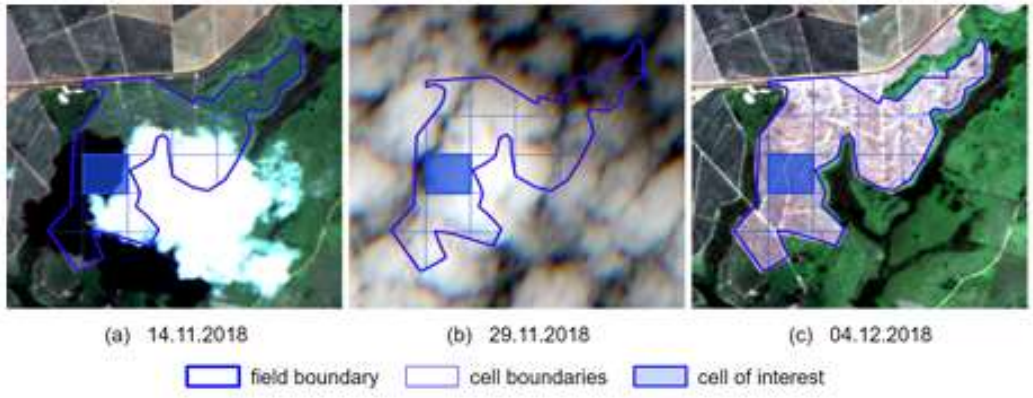

Figura 9 – Efeito da nebulosidade sobre imagens da área de estudo durante o período de colheita. Fonte: Adaptado de Khramov *et al.* (2020).

Liaghat *et al.* (2019) abordam o uso do sensoriamento remoto para otimizar a colheita da cana-de-açúcar, apresentando um modelo para determinar o melhor momento para a colheita de quatro variedades de cana-de-açúcar, utilizando índices de vegetação obtidos de imagens de satélite. O objetivo do estudo concentra-se na melhoria da gestão da colheita de cana-de-açúcar com foco na maximização do conteúdo de sacarose (Pol), visando otimizar a identificação do momento de colheita e criar um mapa de zoneamento para áreas prontas para a colheita. Foram utilizadas imagens do Landsat-8 para calcular

índices de vegetação, como NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), GVI (Índice de Vegetação Verde) e GNDVI (Índice de Diferença Normalizada Verde), para estimar o teor de sacarose. Também foi analisada a correlação entre esses índices e o Pol., como demonstra a Figura 10. O GNDVI apresentou a maior correlação com o Pol ($R^2 = 0,885$), indicando que valores entre 0,50 e 0,55 são ideais para a colheita. Um mapa de zoneamento foi desenvolvido, categorizando áreas como prontas para a colheita, colheita atrasada e não prontas.

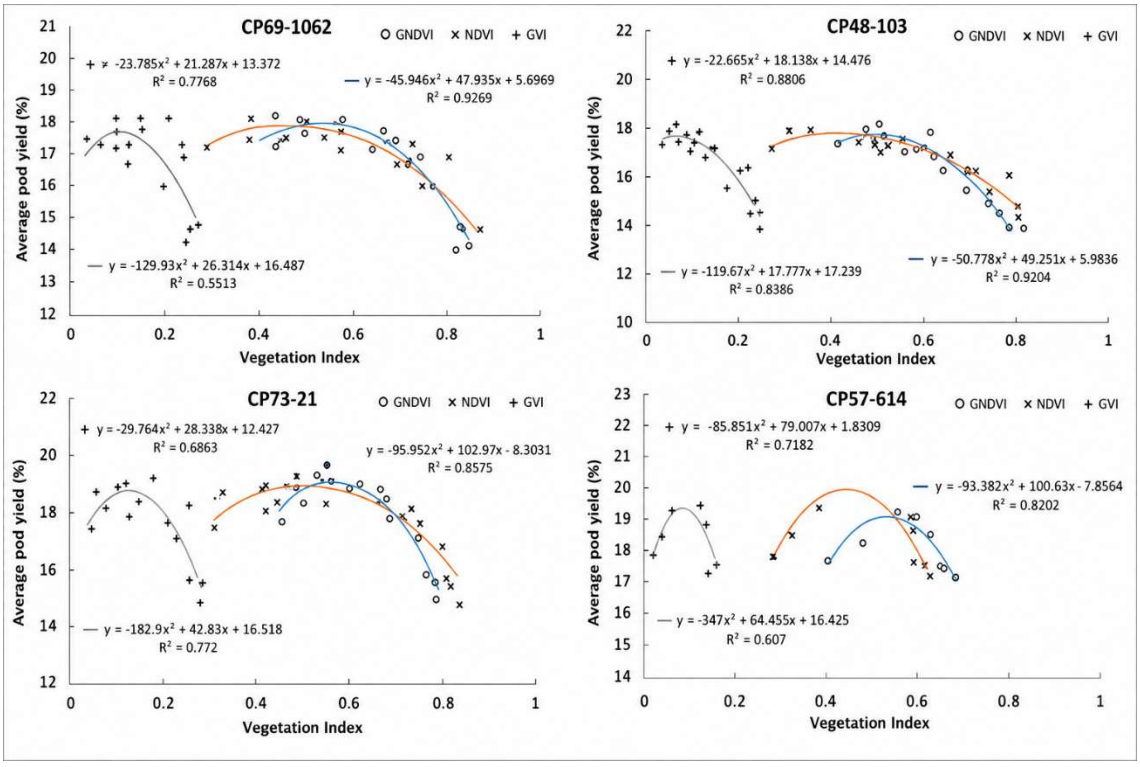

Figura 10 - Correlação entre o índice de vegetação GNDVI e o teor de sacarose (Pol) em diferentes variedades de cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Liaghat *et al.* (2019).

Barbosa Júnior *et al.* (2024) discutem o uso de sensoriamento integrado e aprendizado de máquina para prever açúcares e matérias-primas destinadas à produção de bioenergia. O objetivo do estudo é desenvolver um framework preditivo não invasivo para mapear os insumos da cana-de-açúcar, com foco na previsão de açúcares (para bioetanol de primeira geração) e componentes lignocelulósicos (para bioetanol de segunda geração). Foram utilizadas imagens obtidas por drones equipados com câmeras multiespectrais, dados térmicos e de fluorescência de clorofila. Foram aplicados modelos de aprendizado de máquina, incluindo Random Forest (RF), Regressão Linear Múltipla

(MLR), Árvore de Decisão (DT) e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM). Os modelos de ML mostraram boa precisão na previsão dos insumos, com coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,88 a 0,93 para açúcares de 1G e de 0,56 a 0,82 para insumos de 2G. Dados de sensoriamento remoto, especialmente nas bandas espectrais Blue, Green e Red Edge, foram identificados como características importantes para as previsões. A pesquisa destaca a importância do uso de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para otimizar o momento da colheita, ajudando a aumentar a qualidade dos produtos e a eficiência do processo de produção de bioenergia. A Figura 11 demonstra os modelos aplicados.

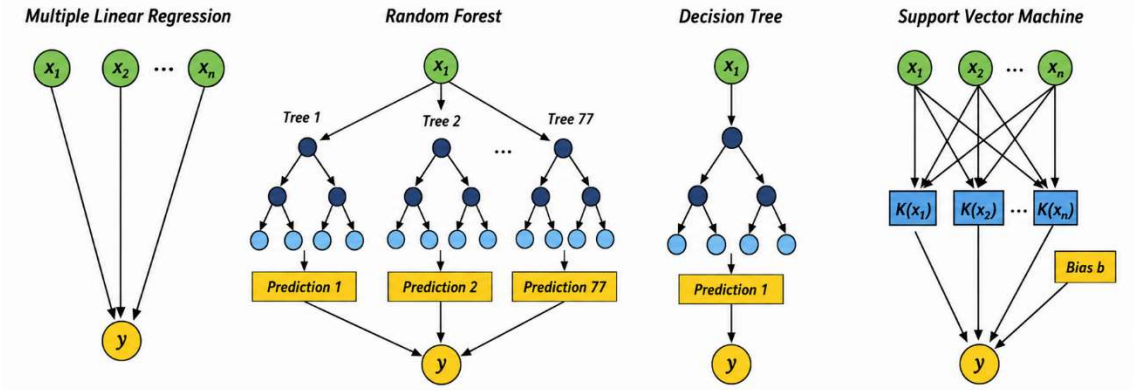

Figura 11 - Arquitetura dos modelos de aprendizado de máquina. Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Barbosa Júnior *et al.* (2024).

Vilarreal *et al.* (2020) abordam o uso de técnicas de sensoriamento remoto para classificar e mapear os estágios de crescimento da cana-de-açúcar auxiliando na gestão eficiente do cultivo. A pesquisa empregou a Análise de Imagem Baseada em Objetos (OBIA) combinada com dados de LiDAR e ortofotos. Foi utilizado o algoritmo de Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) para a classificação, validada por GPS. A classificação alcançou a precisão de 98,4%, mapeando 13,93 hectares de plantação. Os estágios de crescimento identificados foram: estabelecimento (6,65%), tillering (11,61%), formação de rendimento (13,89%) e maturação (17,90%). As precisões para os estágios foram: 88% (estabelecimento), 94,4% (tillering), 96,3% (formação de rendimento) e 91,7% (maturação). Os resultados demonstram a eficácia do uso de técnicas de sensoriamento remoto na identificação precisa dos estágios de crescimento da

cana-de-açúcar, ajuda na tomada de decisões sobre o momento ideal para a colheita e gerenciamento das plantações. A Figura 12 demonstra os estágios de crescimento da cana-de-açúcar na área estudada.

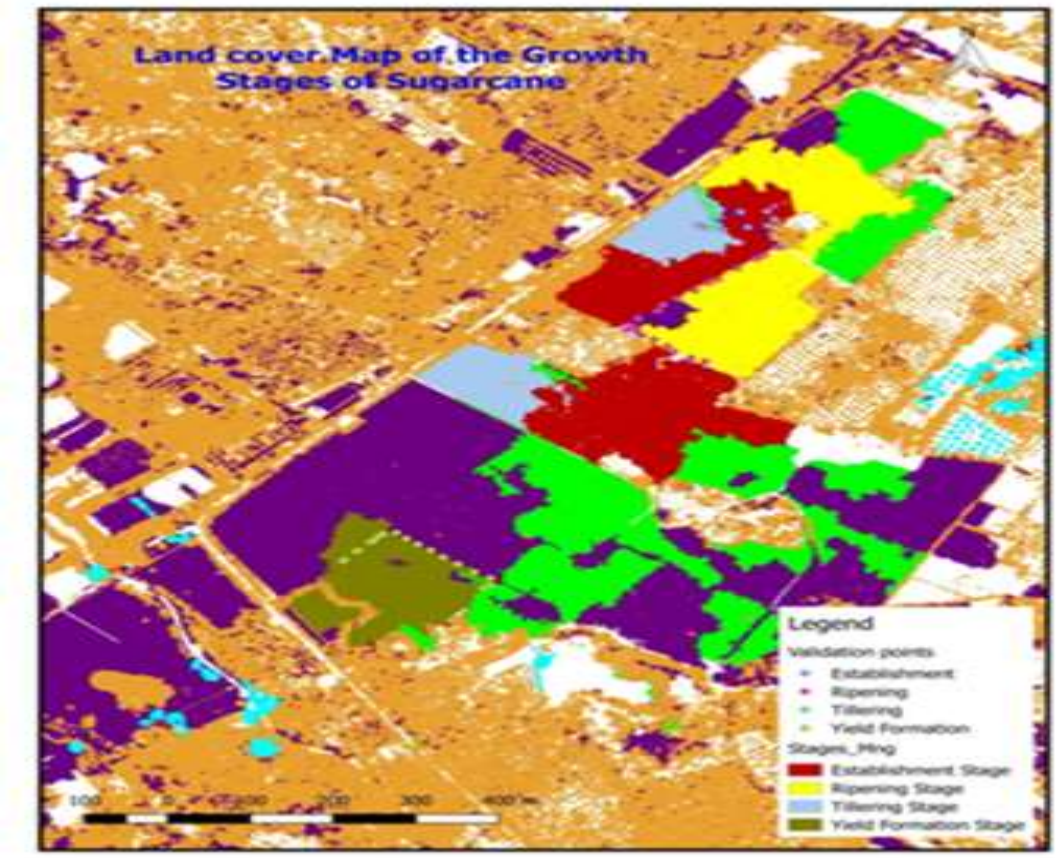

Figura 12 - Mapa de cobertura do solo dos estágios de crescimento da cana-de-açúcar processada. Fonte: Adaptado de Vilarreal *et al.* (2020).

Elkina *et al.* (2022) investigam a previsão de rendimento da cana-de-açúcar utilizando tecnologia de sensoriamento remoto e algoritmos de aprendizado de máquina. A implementação de modelos de previsão baseados em Random Forest (RF) e regressão polinomial de segundo grau, utilizando dados do satélite Sentinel-2 e informações agronômicas coletadas durante a safra 2017-2018, revelaram que o índice de vegetação normalizado verde (GNDVI) apresentou a melhor correlação com o rendimento, com um R^2 de 0,71 em novembro. O modelo RF alcançou a precisão de 90,42%, enquanto a regressão polinomial obteve 88%. Esses resultados indicam que ambos os modelos são eficazes para auxiliar no planejamento operacional das usinas de açúcar. Os autores destacam a importância do momento da aquisição das imagens para a previsão do rendimento, sugerindo que novembro é o período mais apropriado. O artigo conclui que

a combinação de índices de vegetação e técnicas avançadas de modelagem pode aprimorar a previsão do rendimento da cana-de-açúcar, ressaltando a necessidade de mais pesquisas para validar esses modelos em diferentes contextos e variedades de cultivo. A Figura 13 demonstra um comparativo do modelo de regressão e rendimentos reais.

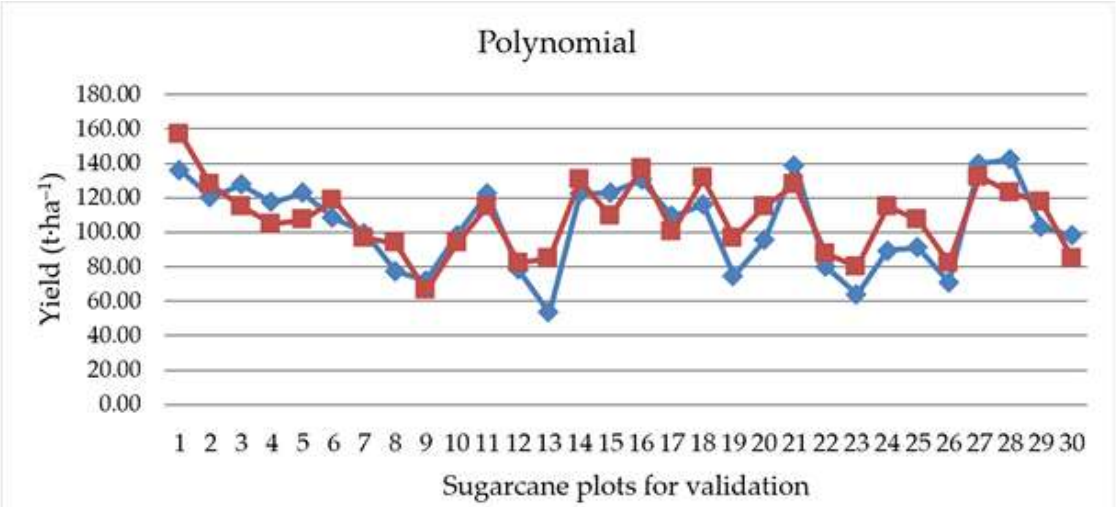

Figura 13 - Comparação entre os rendimentos reais e os estimados pelo modelo de regressão baseado em GNDVI. Fonte: Adaptado de Elkina *et al.* (2022).

Sharma *et al.* (2024) apresentam uma abordagem integrada para melhorar a gestão agrícola na Índia, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e a Internet das Coisas (IoT). O estudo concentra-se em duas abordagens principais: a primeira utiliza descritores de sensoriamento remoto, como índices de umidade e temperatura do solo, para identificar áreas com déficit hídrico; a segunda implanta sensores de umidade conectados a microcontroladores para monitoramento em tempo real. Os dados foram coletados ao longo de um período de dez anos (2015-2024), utilizando imagens do satélite Sentinel-2. A pesquisa resultou na criação do sistema "SMARTS" (Sustainable Management and Agriculture Resource Technology System), que alcançou a precisão de 97,24% nos alertas de umidade. O sistema é escalável e adaptável a diferentes locais, oferecendo base sólida para práticas agrícolas sustentáveis. O estudo também aborda a importância de monitorar as condições climáticas e a umidade do solo, considerando a crescente irregularidade climática e os desafios enfrentados pelos agricultores. A integração de sensoriamento remoto e IoT visa proporcionar uma gestão agrícola mais eficiente e sustentável, contribuindo para a segurança alimentar e o bem-estar dos agricultores. A Figura 14 demonstra um sensor de umidade que pode ser utilizado neste tipo de monitoramento.

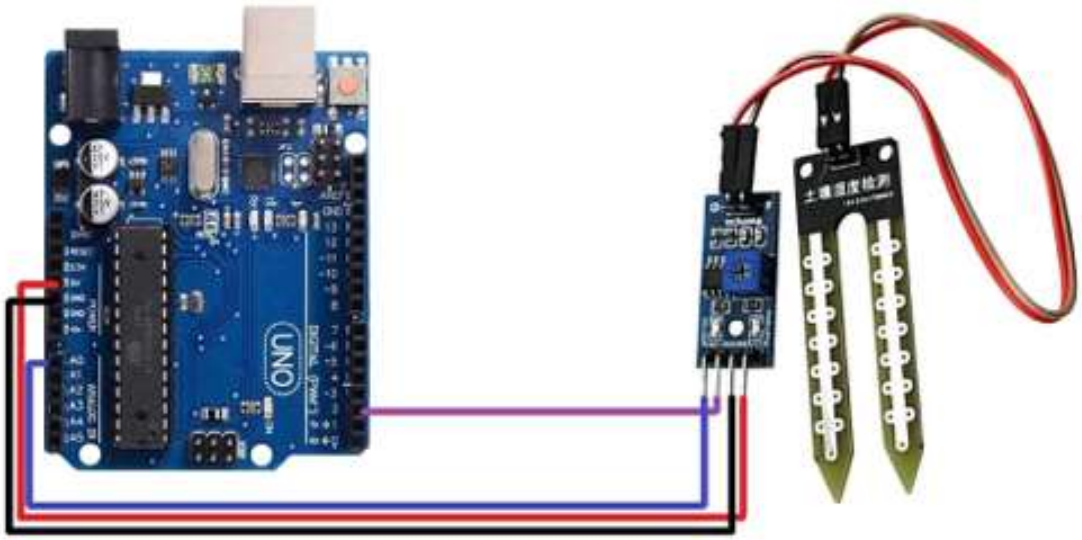

Figura 14 - Microcontrolador Uno e sensor de umidade do solo. Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (2024).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas investigações sobre o uso de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina na determinação da maturação da cana-de-açúcar revelam avanços significativos, mas também destacam desafios que precisam ser superados.

3.3.1. BENEFÍCIOS PARA A AGRICULTURA

A integração do sensoriamento remoto por satélite na gestão agrícola oferece diversos benefícios:

- **Monitoramento Contínuo**: Permite a observação regular das culturas, identificando rapidamente quaisquer anomalias ou necessidades específicas.
- **Otimização de Recursos**: Auxilia na aplicação precisa de insumos, como fertilizantes e irrigação, com base nas necessidades reais das plantas.
- **Planejamento da Colheita**: Fornece informações sobre o estágio de maturação, auxiliando na determinação do momento ideal para a colheita e garantindo a qualidade do produto.

3.3.2. AVANÇOS NA APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Estudos como o de Chaudhari *et al.* (2023) mostraram que a combinação de dados de sensoriamento remoto óptico e de radar de abertura sintética (SAR) pode melhorar a precisão das estimativas de biomassa e rendimento da cana-de-açúcar. A fusão de dados de diferentes fontes proporciona uma visão mais abrangente, permitindo a modelagem de variáveis complexas que afetam o crescimento da cultura. Além disso, a pesquisa de Leandro *et al.* (2024) destacam a eficácia das imagens de alta resolução espacial. Embora o estudo tenha utilizado imagens multiespectrais obtidas por drones, o monitoramento da cultura também pode ser realizado por meio de sensores orbitais, ampliando as possibilidades de acompanhamento de áreas agrícolas em diferentes escalas.

3.3.3. INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS

A integração de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina, como discutido por Barbosa Júnior *et al.* (2024), mostra-se promissora para a previsão de açúcares. A utilização de imagens multiespectrais e dados térmicos permite desenvolver um framework preditivo não invasivo, que pode ser adaptado para diferentes condições de cultivo.

3.3.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A adoção de tecnologias de sensoriamento remoto e algoritmos de aprendizado de máquina apresenta potencial para aumentar a eficiência energética no cultivo da cana-de-açúcar, sobretudo ao contribuir para a otimização do período de colheita, a racionalização do uso de insumos e a redução de operações agrícolas desnecessárias, evitando gastos energéticos associados a atividades repetitivas (Leandro *et al.*, 2024).

Segundo Dimov *et al.* (2022), os modelos de predição de produtividade que utilizam séries temporais de índices de vegetação e métricas fenológicas contribuem para um planejamento agrícola mais eficaz, incluindo a estimativa de rendimento e o dimensionamento da logística de colheita. Ao prever com antecedência o volume de produção, é possível otimizar o uso de transportes e infraestrutura de processamento,

reduzindo o gasto energético associado ao armazenamento e ao transporte desnecessário de biomassa.

3.3.5. DESAFIOS ENFRENTADOS

Apesar dos avanços, ainda existem desafios significativos. A variabilidade climática e as condições atmosféricas, como a presença de nuvens, dificultam a obtenção de dados precisos. A pesquisa de Khramov *et al.* (2020) enfatiza que a combinação de dados ópticos e SAR é uma estratégia eficaz para superar esses obstáculos, melhorando a identificação das datas de colheita, especialmente em períodos de alta nebulosidade. Além disso, a necessidade de validação dos modelos em diferentes contextos e variedades de cana-de-açúcar é crucial. A disponibilidade de dados e o tempo necessário para o pré-processamento das séries temporais, também são desafios a serem superados. O trabalho de Elkina *et al.* (2022) sugere que a precisão das previsões de rendimento depende fortemente do momento da aquisição das imagens, o que exige um planejamento cuidadoso para maximizar a eficácia dos dados obtidos.

3.3.6. IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

Os resultados das pesquisas indicam que o uso de sensoriamento remoto e técnicas de aprendizado de máquina não apenas otimiza a determinação do índice de maturação, mas pode impactar significativamente a gestão agrícola, contribuindo para uma produção mais sustentável e lucrativa.

A implementação dessas tecnologias pode ajudar os produtores a atenderem à crescente demanda por açúcar e bioenergia, melhorando a eficiência dos processos produtivos.

3.4. CONCLUSÕES

A revisão apresenta diferentes aplicações das tecnologias de sensoriamento remoto no setor de sucroenergético. Os artigos demonstraram um panorama promissor,

que pode transformar a gestão agrícola e elevar a eficiência produtiva do setor sucroalcooleiro.

As tecnologias de sensoriamento remoto, aliadas a algoritmos de aprendizado de máquina, oferecem nova abordagem para a monitoramento e a avaliação das condições das lavouras, superando limitações dos métodos tradicionais que, embora eficazes, são custosos e demorados.

Os estudos revisados indicam que a fusão de dados provenientes de diferentes fontes, como imagens ópticas e de radar, resulta em estimativas mais precisas sobre o crescimento e a saúde das plantas, sendo essas informações importantes para avaliar o momento ideal da colheita, fundamental para maximizar a qualidade da matéria-prima e a rentabilidade do cultivo.

Entretanto, a implementação dessas tecnologias não está isenta de desafios. A variabilidade climática, a presença de nuvens e a necessidade de validação em diferentes contextos agronômicos ainda representam barreiras a serem superadas. O planejamento estratégico da aquisição de dados e a adaptação dos modelos às particularidades locais são fundamentais para a eficácia das previsões. A literatura destaca que a precisão dos modelos pode ser significativamente influenciada pelo momento da coleta de dados, o que exige um entendimento profundo das dinâmicas agrícolas.

Além disso, a integração de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), conforme discutido por Sharma *et al.* (2024), pode potencializar ainda mais a gestão agrícola, permitindo o monitoramento em tempo real das condições das lavouras. Essa abordagem integrada não apenas melhora a capacidade de resposta dos agricultores às condições climáticas variáveis, mas também contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas com a crescente demanda global por açúcar e bioenergia.

Portanto, a continuidade das pesquisas nesse campo é essencial. O desenvolvimento de modelos mais robustos, a validação em diferentes regiões e a adaptação às especificidades de cada cultivar poderão contribuir para que as tecnologias de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina cumpram seu potencial transformador. A adoção dessas inovações poderá não apenas otimizar a produção de cana-de-açúcar, mas também contribuir para a sustentabilidade econômica e ambiental do setor, promovendo um futuro mais eficiente e rentável para a agricultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA JÚNIOR, M.R. et al, *Integrated sensing and machine learning: Predicting saccharine and bioenergy feedstocks in sugarcane,* v. 215, 2024. Disponível em: **https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118627**. Acesso em: 17 fev. 2025.

CHAUDHARI, K. et al, *Machine learning model ensemble for predicting sugarcane yield through Synergy of optical and SAR remote sensing,* v. 30, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100962. Acesso em: 12 fev. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Safra 2024/2025. Primeiro Levantamento (abril/2024). Disponível em: http://www.conab.gov.br. Acesso em: 20 Fev. 2025.

DIMOV, D. et al, *Sugarcane yield estimation through remote sensing time series and phenology metrics,* v. 2, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100046. Acesso em: 13 fev. 2025.

ELKINA, E. et al, *Sugarcane Yield Prediction Using Vegetation Indices in Northern Karnataka, India,* v. 10; 2022. Disponível em: https://doi.org/10.13189/ujar.2022.100611. Acesso em: 02 fev. 2025.

KHRAMOV, D. et al, *Monitoring of sugarcane harvest in Brazil based on optical and Sar data,* v. 12, 2020. Disponível em: **https://doi.org/10.3390/rs12244080**. Acesso em: 25 fev. 2025.

LEANDRO, E. R.. et al, *Estimating sugarcane maturity using high spatial resolution remote sensing images,* v. 4 333-347 p, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/crops4030024. Acesso em: 12 fev. 2025.

LIAGHAT, A. et al, O*ptimization of sugarcane harvest using remote sensing,* int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-4/W18, 857–861, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-857-2019. Acesso em: 03 fev. 2025.

SHAKIR, A.K. , *Optimal Deep Learning Driven Smart Sugarcane Crop Monitoring on Remote Sensing Images,* v. 2023 n. 2, 2023. Disponível em: jsiot-2022-0011. Acesso em: 14 fev. 2025.

SHARMA, N. et al, *Sustainable management and agriculture resource technology system using remote sensing descriptors and IoT,* v. 76, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geomat.2024.100040. Acesso em: 23 fev. 2025.

SILVEIRA, J. M. C. et al, *Uso de imagens multiespectrais e termográficas para monitoramento das condições hídricas da cana-de-açúcar,* v. 25 n4 689-696 p, 2020.

Disponível em: https://doi.org/10.15809/irriga.2020v25n4p689-696. Acesso em: 13 fev. 2025.

VELÁZQUEZ, S. S.. et al, *Machine learning and remote sensing to monitor the maturation of sugarcane* in *C*onference El machine learning y la teledetección para monitorear la maduración de la caña de azúcar, *2023,* Michoacan, México .Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378654780. Acesso em: 13 fev. 2025.

VILARREAL, M.K.. et al, R*emote sensing techniques for classification and mapping of sugarcane growth,* v. 10, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.48084/etasr.3694. Acesso em: 17 fev. 2025.

4. CAPÍTULO 2

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E PREDIÇÃO DO MOMENTO ÓTIMO DE COLHEITA UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO MULTIESPECTRAL

RESUMO

Este estudo apresenta o desenvolvimento de um sistema computacional automatizado para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar, fundamentado no processamento de imagens orbitais multiespectrais e na análise temporal de índices de vegetação. A abordagem metodológica integra dados dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX, considerando as diferenças de resolução espacial, disponibilidade temporal e características espectrais dos sensores para a obtenção de informações representativas das condições vegetativas dos talhões agrícolas. O processamento compreende a seleção de imagens, o controle de qualidade das observações, a extração de valores de reflectância nas bandas espectrais e o cálculo dos índices NDVI e GNDVI, organizados em séries temporais para caracterização da dinâmica espectral da cultura. A comparação entre os índices evidenciou menor dispersão temporal do GNDVI na maioria dos talhões avaliados, fundamentando sua seleção para a construção do modelo matemático de estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR), por meio de variáveis derivadas de seu comportamento temporal e relacionadas aos valores laboratoriais obtidos na colheita. A implementação computacional contempla a automatização das etapas de aquisição, processamento e apresentação dos dados, permitindo consultas georreferenciadas, visualização das imagens orbitais, acompanhamento dos índices espectrais e obtenção de estimativas relacionadas à maturação e ao planejamento da colheita. A metodologia foi aplicada a talhões agrícolas da Fazenda Santa Laura, localizada em Vicentinópolis, Goiás, utilizando registros espectrais e dados agronômicos para a construção e avaliação do modelo. A proposta estabelece uma estrutura integrada de processamento e interpretação de informações multissensores, direcionada ao desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão agrícola baseada em parâmetros espectrais e tecnológicos da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: cana-de-açúcar; sensoriamento remoto; NDVI; GNDVI; monitoramento agrícola; ponto ótimo de colheita; eficiência energética.

ABSTRACT

This study presents the development of an automated computational system for monitoring sugarcane maturation, based on the processing of multispectral satellite imagery and the temporal analysis of vegetation indices. The methodological approach integrates data from the Sentinel-2, Landsat-9, and CBERS-4/MUX satellites, considering differences in spatial resolution, temporal availability, and spectral characteristics of the sensors to obtain representative information about the vegetative conditions of agricultural fields. The processing workflow includes image selection, observation quality control, extraction of reflectance values from spectral bands, and calculation of the NDVI and GNDVI indices, organized into time series to characterize the spectral dynamics of the crop. The comparison between the indices revealed lower temporal dispersion of GNDVI in most of the evaluated fields, supporting its selection for the development of a mathematical model to estimate Total Recoverable Sugar (TRS), using variables derived from its temporal behavior and related to laboratory measurements obtained at harvest. The computational implementation automates data acquisition, processing, and presentation, enabling georeferenced queries, visualization of satellite imagery, monitoring of spectral indices, and generation of estimates related to crop maturation and harvest planning. The methodology was applied to agricultural fields at Santa Laura Farm, located in Vicentinópolis, Goiás, Brazil, using spectral observations and agronomic data for model development and evaluation. The proposed approach establishes an integrated framework for processing and interpreting multisensory information, aimed at developing an agricultural decision-support tool based on spectral and technological parameters of sugarcane.

Keywords: sugarcane; remote sensing; NDVI; GNDVI; agricultural monitoring; optimal harvest timing; energy efficiency.

4.1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) representa uma das culturas agrícolas de maior relevância econômica e energética do Brasil, constituindo matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e bioenergia. O país responde por aproximadamente 45% das exportações mundiais de açúcar e lidera a produção de biocombustíveis derivados dessa cultura (Rodrigues; Ross, 2020; UNICA, 2020). De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento, a safra 2023/2024 atingiu a produção de 652,9 milhões de toneladas (CONAB, 2023), consolidando o papel estratégico da cana-de-açúcar na matriz energética renovável brasileira.

O desempenho do setor sucroenergético está fortemente relacionado à eficiência produtiva e energética, aspectos diretamente relacionados à determinação adequada do ponto de maturação da cana, momento que os colmos apresentam o máximo teor de açúcares totais recuperáveis (ATR). A maturação, portanto, influencia não apenas a produtividade agrícola e industrial, mas também o rendimento energético da biomassa destinada à produção de etanol e à cogeração elétrica (Gascho; Shih, 1983; Monteiro, 2009).

Historicamente, a avaliação da maturação é feita por amostragens de campo e análises laboratoriais, procedimentos que demandam tempo, mão de obra e recursos financeiros, além de apresentarem baixa representatividade espacial (Mundim, 2009). Esses métodos tradicionais podem resultar em decisões de colheita imprecisas, comprometendo o aproveitamento energético e aumentando o consumo de insumos e combustíveis. Em contrapartida, técnicas de sensoriamento remoto orbital vêm sendo amplamente estudadas como alternativa moderna e sustentável para o monitoramento do desenvolvimento fenológico e do ponto de maturação da cana-de-açúcar (Rahman; Robson, 2016; Fiorio *et al.*, 2018; Costa, 2024).

De acordo com Costa (2024), o uso de sensores multiespectrais a bordo dos satélites CBERS-4 e CBERS-4A tem demonstrado grande potencial para o acompanhamento do ciclo produtivo e estimativas de produtividade da cultura, quando combinados a variáveis meteorológicas, agronômicas e de relevo. O autor destaca que a integração de séries temporais de índices espectrais, como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index) e SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), com algoritmos de aprendizado de máquina, permite modelar o comportamento

da cultura e fornecer antecipadamente informações relevantes sobre o estágio de maturação e vigor vegetativo.

A adoção dessas tecnologias contribui significativamente para a eficiência energética do processo produtivo, uma vez que possibilita o planejamento da colheita com base em dados objetivos e contínuos, reduzindo desperdícios e maximizando o teor energético da biomassa (Fernandes *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2022). Além disso, o uso de imagens de satélite pode reduzir a necessidade de deslocamento de maquinário e de amostragens físicas, minimizando a compactação e a contaminação do solo por combustíveis, fertilizantes e defensivos químicos — fatores que impactam diretamente a sustentabilidade do sistema agrícola (Silva; Barbosa, 2021; Pignéde *et al.*, 2021).

Sob essa perspectiva, o sensoriamento remoto surge como ferramenta essencial para a transição em direção a uma agricultura de precisão sustentável, capaz de unir produtividade, conservação ambiental e eficiência energética. A aplicação dessas técnicas permite o monitoramento não destrutivo e multitemporal das lavouras, contribuindo para práticas agrícolas alinhadas aos princípios da economia verde e às metas de descarbonização propostas pelo programa RenovaBio (BRASIL, 2017; Grassi; Pereira, 2019).

Diante desse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar, fundamentado na integração de imagens orbitais multiespectrais e índices espectrais de vegetação. A proposta busca acompanhar a dinâmica temporal da cultura, estabelecer relações entre as informações espectrais e os parâmetros agronômicos e tecnológicos e fornecer estimativas que auxiliem na identificação do período favorável à colheita. Dessa forma, pretende-se contribuir para o planejamento das operações agrícolas e para a utilização mais eficiente dos recursos produtivos, considerando as perspectivas de sustentabilidade e eficiência energética do setor sucroenergético.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. ÁREA DE ESTUDO

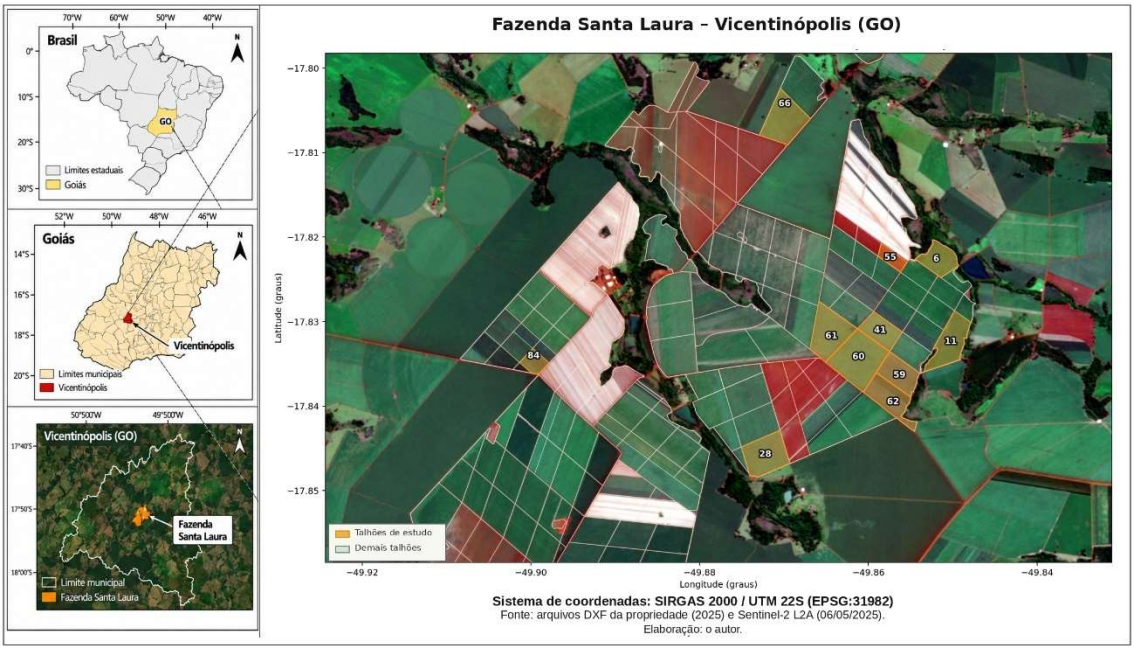

Figura 15 – Localização da Fazenda Santa Laura e dos talhões analisados em Vicentinópolis (GO). Fonte: Elaborado pelo autor com base nos arquivos vetoriais da propriedade (2025).

A área de estudo compreende uma região de cultivo de cana-de-açúcar localizada no município de Vicentinópolis, no estado de Goiás, na região Centro-Oeste do Brasil. O contexto climático regional é caracterizado pela predominância do clima tropical sazonal, com duas estações bem definidas: uma chuvosa, concentrada principalmente entre outubro e abril, e outra seca, entre maio e setembro. Essa sazonalidade influencia a disponibilidade hídrica e as condições de desenvolvimento das culturas agrícolas (Silva *et al.*, 1998; EMBRAPA, 2007).

A área de estudo está inserida no contexto dos solos do Cerrado brasileiro, em que há ampla ocorrência de Latossolos Vermelhos apresentam ampla ocorrência. Esses solos caracterizam-se por elevada profundidade, boa drenagem e condições físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Entretanto, podem apresentar limitações químicas, especialmente acidez elevada e baixa fertilidade natural, tornando necessárias práticas adequadas de manejo, correção da acidez e adubação para assegurar o desenvolvimento da cultura (Santos; Zaroni, 2021; Santos *et al.*, 2018).

A escolha da área justifica-se pela localização na região Sul de Goiás, inserida em um importante contexto de produção sucroenergética, e pela disponibilidade de dados obtidos em campo e por análises laboratoriais referentes ao açúcar total recuperável (ATR), utilizados para estabelecer relações com os índices espectrais derivados de imagens de satélite.

Para o desenvolvimento deste estudo, foram considerados 11 talhões de cana-de-açúcar da Fazenda Santa Laura, identificados pelos números 06, 11, 28, 41, 55, 59, 60, 61, 62, 66 e 84, abrangendo diferentes variedades e condições de cultivo. Inicialmente, foram selecionados os talhões 60 e 61, cultivados com a variedade CTC4, e o talhão 62, cultivado com a variedade RB127825, para o acompanhamento do comportamento espectral da cultura. Os demais talhões foram incorporados ao estudo para ampliar a avaliação do sistema, por meio da comparação entre os valores de ATR estimados a partir dos índices espectrais e aqueles determinados por meio de análises laboratoriais.

4.2.2. AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO

Os dados de campo utilizados no desenvolvimento e na avaliação da metodologia foram obtidos a partir dos registros agrícolas da Fazenda Santa Laura, localizada no município de Vicentinópolis, Goiás. Essas informações constituíram a base de referência para a caracterização das condições produtivas da cana-de-açúcar e para a comparação entre as estimativas geradas pelo sistema e valores de Açúcar Total Recuperável (ATR) determinados em condições reais de produção.

Para a caracterização dos dados agrícolas, foram utilizados registros históricos da propriedade referentes ao período de 2020 a 2025, contemplando informações sobre os talhões, as áreas destinadas ao corte e a produtividade agrícola. Esses registros permitiram identificar a variabilidade das condições produtivas ao longo do período analisado, fornecendo informações complementares à contextualização agronômica do estudo. A Tabela 1 apresenta a síntese dos dados agrícolas utilizados, evidenciando as variações da área cultivada e da produtividade da cana-de-açúcar nas diferentes safras.

Ano	Talhões	Área de corte (ha)	TCH estimado (t/ha)	TCH real (t/ha)
2020	202	3.172,00	103,00	–
2021	223	3.408,93	92,88	–
2022	224	3.493,45	76,99	–
2023	203	2.987,79	73,04	–
2024	201	2.987,09	73,05	78,25
2025	208	2.997,39	84,62	80,72

Tabela 1 – Caracterização dos dados agrícolas da Fazenda Santa Laura no período de 2020 a 2025. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos registros agrícolas da Fazenda Santa Laura (2020–2025).

Além dos registros históricos de produção, foram utilizados os valores de ATR obtidos por meio de análises laboratoriais realizadas por ocasião da colheita dos talhões avaliados. O Açúcar Total Recuperável (ATR) representa a quantidade de açúcares potencialmente recuperáveis durante o processamento industrial da cana-de-açúcar, constituindo um parâmetro tecnológico de referência para a avaliação da qualidade da matéria-prima e de seu aproveitamento econômico (CONSECANA-SP, 2006).

Considerando a disponibilidade de registros agrícolas referentes a diferentes safras, optou-se por delimitar temporalmente o estudo à safra de 2025, selecionando-se, entre as bases de dados disponibilizadas pela propriedade, a planilha correspondente a esse período. Essa delimitação teve como finalidade estabelecer recorte temporal definido para a análise, permitindo concentrar a investigação em um mesmo ciclo produtivo e relacionar os dados agronômicos e tecnológicos às observações espectrais obtidas por satélite. A adoção da safra de 2025 como referência proporcionou uma base de comparação entre os registros de campo e as informações geradas pelo sistema, assegurando a coerência temporal necessária à avaliação da metodologia proposta.

A base de dados selecionada reúne informações relativas à identificação dos talhões, às variedades cultivadas, ao número de cortes, às áreas agrícolas, à produtividade e aos valores de ATR registrados na safra. Esses dados permitiram caracterizar a produção da propriedade, considerando as particularidades dos talhões e as diferenças observadas entre as condições de cultivo e os resultados obtidos.

Os valores de ATR foram considerados como registros tecnológicos associados à colheita, não correspondendo a medições sucessivas realizadas ao longo do desenvolvimento da cultura. Dessa forma, a organização dos dados preservou as

informações efetivamente disponibilizadas pela propriedade, sem a atribuição de valores intermediários não determinados em laboratório. A Tabela 2 apresenta a caracterização dos talhões considerados, constituindo a base documental das análises desenvolvidas neste estudo.

Talhão	Variedade	Área de corte (ha)	Produtividade (t/ha)	ATR (kg/t)
6	IACSP95 5094	14,06	64,60	147,25
11	RB96 6928	20,92	64,60	70,63
28	RB 92 8064	23,27	54,00	155,83
55	RB12 7825	10,58	131,20	121,40
59	RB12 7825	15,95	95,00	134,61
60	CTC4	33,61	64,50	134,61
61	CTC4	24,57	64,50	149,25
62	RB12 7825 / 3280	19,21	64,50	161,33
66	CV 7870	24,47	85,00	134,61
84	RB97 5952	6,67	97,00	82,36

Tabela 2 – Dados agronômicos dos talhões avaliados na safra 2025. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos registros agrícolas da Fazenda Santa Laura (2025).

4.2.3. AQUISIÇÃO DE DADOS ESPACIAIS

A aquisição dos dados espaciais foi realizada por meio de imagens orbitais multiespectrais provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX, considerando a localização geográfica dos talhões agrícolas, o período de monitoramento e a disponibilidade de imagens adequadas ao processamento, considerando as seguintes características dos sensores:

- MSI/Sentinel-2 (European Space Agency – ESA): resolução espacial de até 10 m nas bandas utilizadas e frequência de revisita de aproximadamente cinco dias, considerando a constelação Sentinel-2;

- OLI-2/Landsat-9 (NASA/USGS): resolução espacial de 30 m nas bandas multiespectrais e ciclo de revisita de aproximadamente dezesseis dias;

- CBERS-4/MUX (INPE): resolução espacial de 20 m nas bandas multiespectrais e ciclo de revisita de aproximadamente vinte e seis dias.

As imagens dos satélites Sentinel-2 e Landsat-9 foram obtidas a partir de produtos de reflectância de superfície do conjunto *Harmonized Landsat and Sentinel-2* (HLS). Esses produtos apresentam correções atmosféricas e geométricas, além de procedimentos de harmonização destinados a reduzir as diferenças entre as observações dos sensores.

Para o CBERS-4, foram utilizados produtos provenientes do sensor MUX, disponibilizados pelo catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Diferentemente dos produtos HLS, essas imagens não integram o mesmo processo de harmonização, sendo consideradas suas características próprias de aquisição e processamento nas etapas posteriores da metodologia.

A seleção das imagens foi realizada a partir das coordenadas geográficas dos talhões e dos intervalos temporais definidos para as consultas. Cada observação foi identificada pela data efetiva de aquisição e pelo sensor correspondente, sem a exigência de registros simultâneos das três plataformas. A disponibilidade das cenas variou em função dos ciclos orbitais, da cobertura de nuvens e das condições de qualidade das imagens, sendo utilizadas exclusivamente as observações válidas encontradas nos períodos analisados. A Figura 16 apresenta exemplos das imagens orbitais adquiridas pelo sistema, evidenciando as diferentes fontes de dados utilizadas no monitoramento das áreas agrícolas.

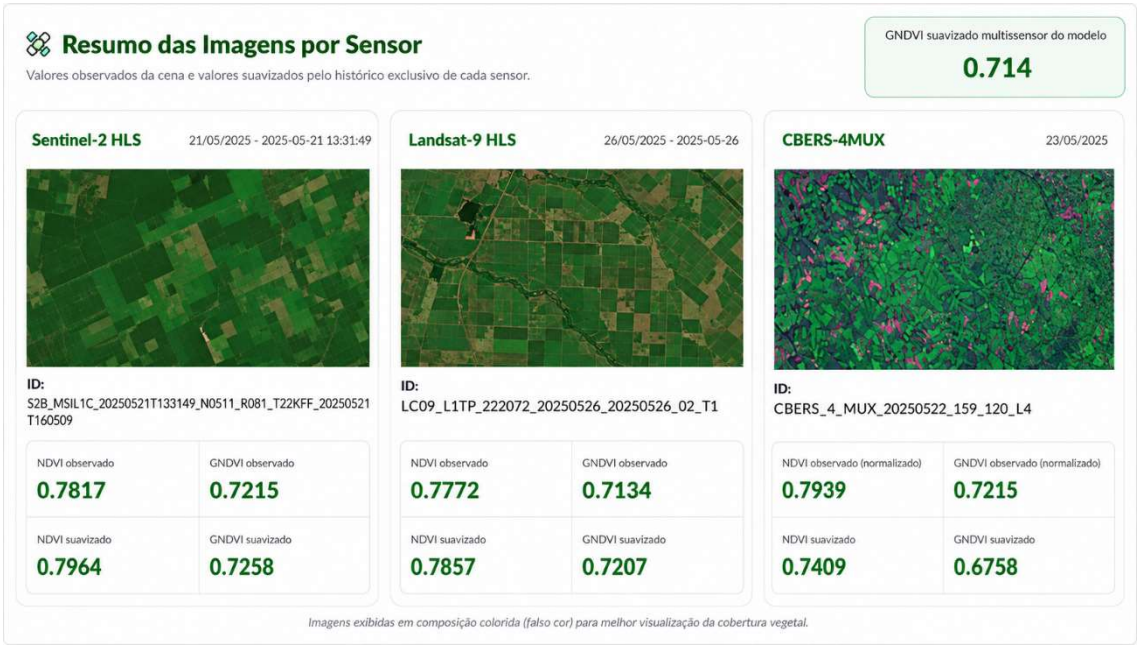

Figura 16 – Imagens orbitais obtidas pelos sensores Sentinel-2 HLS, Landsat-9 HLS e CBERS-4/MUX. Fonte: Elaborado pelo autor com imagens do sistema (2026).

Em determinadas janelas temporais, a ausência de imagens válidas de um dos sensores não impediu a continuidade da aquisição dos dados espaciais, uma vez que as observações disponíveis dos demais satélites foram mantidas para a composição da base temporal. A Figura 17 apresenta exemplos das observações utilizadas no monitoramento, demonstrando a disponibilidade de imagens e informações espectrais provenientes dos diferentes sensores.

Figura 17 – Imagens orbitais e índices NDVI e GNDVI utilizados no monitoramento multissensor da cana-de-açúcar. Fonte: Elaborado pelo autor com imagens do sistema (2026).

Para cada talhão, foram utilizadas suas coordenadas geográficas como referência espacial para a consulta das imagens orbitais. A Tabela 3 apresenta a localização dos 11 talhões avaliados, o número de observações orbitais obtidas, o intervalo temporal efetivamente contemplado pelas imagens e os sensores utilizados. A integração das observações provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX possibilitou a construção das séries temporais empregadas posteriormente no cálculo e na análise dos índices NDVI e GNDVI.

Talhão	Latitude	Longitude	Registros	Primeira imagem	Última imagem	Sensores utilizados
6	-17,822646	-49,851607	15	03/06/2025	15/10/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
11	-17,832458	-49,850289	9	24/04/2025	06/07/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
28	-17,845778	-49,872172	16	10/05/2025	26/08/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
41	-17,831119	-49,858533	15	10/05/2025	13/09/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
55	-17,816038	-49,862382	17	24/04/2025	29/09/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
59	-17,836179	-49,856370	13	08/04/2025	14/07/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
60	-17,834481	-49,861149	13	08/04/2025	13/07/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
61	-17,831292	-49,864603	13	08/04/2025	30/07/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
62	-17,839077	-49,857456	12	08/04/2025	10/07/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
66	-17,806152	-49,869970	9	08/04/2025	11/06/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4
84	-17,834815	-49,899583	13	08/04/2025	10/07/2025	Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4

Tabela 3 – Caracterização espacial e temporal dos talhões utilizados na obtenção das imagens orbitais. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que o número de imagens disponíveis variou entre os talhões e períodos analisados. Essa variação decorre das diferentes datas de passagem dos sensores e da disponibilidade de cenas consideradas válidas para processamento sem exigir a presença simultânea dos três sensores em cada período, sendo utilizadas as observações efetivamente disponíveis para a composição da série temporal multissensor.

4.2.4. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS ESPECTRAIS

Antes da obtenção dos valores espectrais, foi realizado o controle de qualidade dos pixels presentes nas imagens. Essa etapa teve como finalidade impedir que elementos

que não representassem adequadamente a cobertura vegetal da cana-de-açúcar interferissem no cálculo posterior dos índices espectrais.

Para as imagens provenientes do conjunto HLS, foram utilizadas as informações de qualidade disponibilizadas juntamente com cada produto. A máscara de qualidade permite identificar pixels associados a condições que podem comprometer a resposta espectral da superfície, tais como a presença de nuvens, sombras de nuvens, regiões adjacentes às nuvens, neve ou gelo e corpos d'água.

Os pixels identificados nessas classes foram excluídos da análise, permanecendo somente aqueles considerados adequados para a representação da superfície vegetal. Portanto, o procedimento adotado não realizou a correção de um pixel contaminado por nuvem ou sombra; o pixel considerado inadequado simplesmente deixou de participar da determinação dos valores espectrais utilizados pelo sistema.

Para as imagens do CBERS-4/MUX foi empregada a informação de qualidade associada ao produto utilizado, permitindo igualmente a identificação e exclusão de pixels inadequados antes da extração das informações espectrais.

O mascaramento foi realizado anteriormente ao cálculo dos índices de vegetação. Assim, a sequência do processamento é representada na Figura 18:

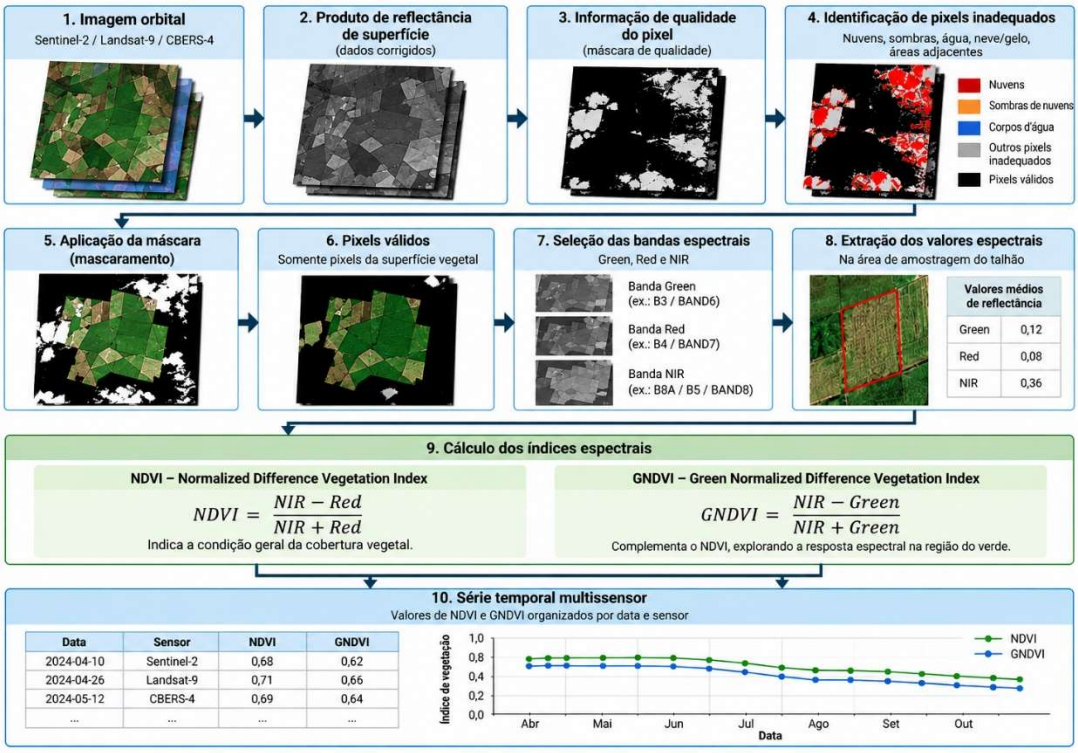

Figura 18 – Fluxo de processamento das **imagens orbitais. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).**

Essa etapa é particularmente importante em estudos multitemporais, uma vez que um pixel afetado por nuvem ou sombra pode apresentar redução artificial nos valores de reflectância e, consequentemente, provocar alterações abruptas no cálculo dos índices espectrais.

4.2.5. ÍNDICES ESPECTRAIS

A utilização de índices espectrais de vegetação constitui uma das principais aplicações do sensoriamento remoto no monitoramento agrícola, permitindo avaliar a dinâmica da cobertura vegetal e acompanhar alterações nas condições das culturas ao longo de seu desenvolvimento. Esses índices são calculados por meio de combinações matemáticas entre as reflectâncias registradas em diferentes bandas espectrais dos sensores orbitais, possibilitando a obtenção de indicadores relacionados ao vigor vegetativo, à atividade fotossintética, ao conteúdo de clorofila e às respostas da vegetação às condições ambientais (xue; Su, 2017; Gitelson; Kaufman; Merzlyak, 1996).

Neste estudo, foram inicialmente selecionados os índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) para comparação de seus comportamentos temporais no monitoramento da cana-de-açúcar. A escolha dos índices foi fundamentada na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 1 desta dissertação, que contribuiu para a definição da abordagem metodológica adotada no monitoramento da maturação da cana-de-açúcar.

A utilização de dois índices teve como finalidade identificar qual dos indicadores apresentava características mais adequadas ao acompanhamento da evolução espectral da cultura e à posterior construção do modelo matemático de estimativa de ATR. A seleção dos índices considerou suas aplicações descritas na literatura científica e a disponibilidade das bandas espectrais necessárias nos sensores Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX.

O NDVI, apresentado por Rouse *et al.* (1974), é calculado pela diferença normalizada entre as reflectâncias do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), conforme a equação apresentada a seguir:

$$\mathbf{NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)}$$

Os valores do NDVI variam entre −1 e +1, sendo que valores elevados, em condições usuais de cobertura vegetal, estão associados à maior presença e ao vigor da

vegetação. Ao longo do desenvolvimento e da maturação da cana-de-açúcar, alterações na estrutura e na atividade vegetativa podem provocar variações nesse índice. Entretanto, em condições de elevada densidade foliar o NDVI pode apresentar saturação, reduzindo sua sensibilidade às variações da vegetação (Xue; Su, 2017).

O GNDVI, fundamentado no trabalho de Gitelson; Kaufman; Merzlyak, (1996), utiliza a reflectância da banda verde (GREEN) e do infravermelho próximo (NIR), conforme apresentado na Equação:

$$\mathbf{GNDVI = (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN)}$$

Segundo Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996), a utilização da região espectral do verde permite avaliar variações relacionadas à concentração de clorofila, especialmente em condições em que a resposta da banda vermelha apresenta limitações de sensibilidade.

Embora outros índices espectrais, como SAVI, VARI, EVI e NDRE, também apresentem aplicações relevantes no monitoramento da vegetação, conforme discutido na revisão bibliográfica do Capítulo 1, a seleção do NDVI e do GNDVI foi orientada pelos objetivos específicos desta pesquisa. A escolha considerou a complementaridade das respostas espectrais desses indicadores, a disponibilidade das bandas necessárias nos sensores Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX e sua aplicabilidade ao acompanhamento temporal da cana-de-açúcar. Considerou-se, ainda, a ampla difusão do NDVI no monitoramento agrícola e a utilização do GNDVI em aplicações de agricultura de precisão, favorecendo a interpretação dos resultados por agrônomos, técnicos agrícolas e produtores rurais. Dessa forma, a utilização desses dois índices representa uma delimitação metodológica fundamentada na literatura científica, sem pressupor superioridade em relação aos demais indicadores espectrais.

Após o pré-processamento das imagens, os índices foram calculados a partir dos valores representativos de reflectância das bandas selecionadas, mantendo a identificação do sensor, a data efetiva da aquisição e a localização geográfica correspondente. Os valores obtidos constituíram a base para as etapas posteriores de organização temporal e avaliação do comportamento espectral da cultura.

Para as observações provenientes do Sentinel-2/HLS, foram utilizadas as bandas B3, correspondente à região do verde, B4, correspondente ao vermelho, e B8A, correspondente ao infravermelho próximo. Para o Landsat-9/HLS, foram utilizadas as

bandas B3, B4 e B5 para as regiões do verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente. Nas imagens CBERS-4/MUX, foram utilizadas as bandas espectralmente equivalentes: BAND6 para o verde, BAND7 para o vermelho e BAND8 para o infravermelho próximo.

A comparação inicial entre NDVI e GNDVI foi realizada a partir da organização cronológica dos valores obtidos nas imagens orbitais, considerando as respectivas datas de aquisição e os sensores utilizados. A análise das séries temporais permitiu observar as variações dos índices ao longo do desenvolvimento da cana-de-açúcar, considerando tanto as tendências predominantes quanto as diferenças entre observações sucessivas.

Nas condições avaliadas, o GNDVI apresentou, predominantemente, menor dispersão temporal em comparação ao NDVI, característica considerada favorável à interpretação da evolução espectral da cultura. A comparação também evidenciou que esse comportamento não foi uniforme entre todos os talhões, uma vez que fatores agronômicos específicos podem modificar a resposta espectral da vegetação. A avaliação quantitativa dessas diferenças é apresentada na seção de Resultados e Discussão.

A partir dessa análise comparativa, optou-se pela utilização do GNDVI como índice de referência para a construção do modelo matemático de estimativa do ATR. A escolha foi fundamentada no comportamento temporal observado e nas características espectrais do índice, especialmente sua relação com alterações da vegetação associadas ao conteúdo de clorofila. O NDVI permaneceu disponível no sistema para acompanhamento e comparação das respostas espectrais, não sendo utilizado como variável preditora na equação de regressão.

Ressalta-se que o NDVI e o GNDVI representam respostas espectrais da vegetação e não medidas diretas da concentração de sacarose ou do Açúcar Total Recuperável (ATR). Dessa forma, a estimativa quantitativa do ATR foi fundamentada na relação entre variáveis temporais derivadas do GNDVI e os valores laboratoriais obtidos na colheita, conforme descrito na seção de construção do modelo matemático.

4.2.6 – EXTRAÇÃO DE VALORES ESPECTRAIS

Após o pré-processamento das imagens, a localização espacial da análise foi definida a partir das coordenadas geográficas de latitude e longitude associadas a cada talhão. Essas coordenadas foram utilizadas como ponto de referência para estabelecer

uma região circular de amostragem com raio de 50 m, permitindo considerar um conjunto de pixels ao redor da posição analisada, em vez de utilizar exclusivamente o valor de um único pixel.

Para cada cena orbital, a região de amostragem foi interseccionada com os dados raster correspondentes às bandas espectrais selecionadas. Nessa etapa, foram considerados exclusivamente os pixels classificados como válidos após a aplicação das máscaras de qualidade. Dessa forma, pixels comprometidos por nuvens, sombras, água ou demais condições identificadas como inadequadas foram excluídos antes da determinação da resposta espectral representativa da área.

Após a exclusão dos pixels inadequados, foi aplicada uma redução espacial baseada na mediana dos valores de reflectância dos pixels válidos presentes na região de amostragem. A utilização da mediana teve como finalidade reduzir a influência de valores extremos ou de pixels isolados que pudessem produzir variações não representativas da condição predominante da área analisada.

Para uma determinada banda espectral, considerando n pixels válidos contidos na região de amostragem, o valor representativo pode ser expresso por:

$$R_\beta = \text{mediana}(r_1, r_2, \ldots, r_n)$$

em que R_β representa o valor de reflectância utilizado pelo sistema para a banda espectral analisada; r_1, r_2, ..., r_n representam os valores de reflectância dos pixels válidos; e n representa a quantidade de pixels considerados na região de amostragem.

Esse procedimento foi aplicado às bandas necessárias ao cálculo dos índices espectrais, resultando, para cada observação orbital válida, em valores representativos das regiões do verde (GREEN), vermelho (RED) e infravermelho próximo (NIR). Cada conjunto de valores permaneceu associado às coordenadas geográficas da área analisada, à data efetiva de aquisição da imagem e ao sensor responsável pela observação.

Os valores representativos de reflectância obtidos para cada banda espectral constituíram a base para o cálculo dos índices NDVI e GNDVI, conforme as equações apresentadas na seção anterior. Cada observação permaneceu associada à data efetiva de aquisição da imagem, ao sensor responsável e às coordenadas geográficas da área analisada. Os índices resultantes foram posteriormente utilizados na construção da série

temporal multissensor, submetida aos procedimentos de harmonização e suavização descritos nas seções seguintes.

4.2.7. HARMONIZAÇÃO DAS OBSERVAÇÕES MULTISSENSORES

As observações do Sentinel-2 e do Landsat-9 foram obtidas por meio dos produtos de reflectância de superfície do conjunto *Harmonized Landsat and Sentinel-2* (HLS). Dessa forma, esses dois conjuntos de dados já apresentam procedimentos de harmonização que favorecem a análise conjunta. As observações do CBERS-4/MUX, obtidas separadamente a partir de produtos de reflectância de superfície, precisaram ser compatibilizadas com a referência adotada na série HLS antes de sua integração à análise temporal.

A harmonização dos índices foi representada por uma transformação linear entre o valor originalmente obtido pelo sensor e o valor correspondente à referência:

$$I_H = a + bI_S$$

em que $I_H$representa o índice harmonizado, $I_S$corresponde ao índice originalmente calculado para o sensor a ser compatibilizado, $a$representa o coeficiente de deslocamento e bo coeficiente de ajuste de escala.

Para integrar as observações provenientes do CBERS-4/MUX à série temporal de referência HLS, os coeficientes “a” e “b” foram determinados a partir da relação entre observações comparáveis dos sensores. A relação entre os valores foi determinada por regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados, que ajusta uma reta de modo a minimizar as diferenças entre os valores observados e os valores estimados.

Nesse ajuste, o coeficiente “a” corresponde ao intercepto da reta de regressão e representa o deslocamento sistemático entre as séries, enquanto o coeficiente “b” corresponde à inclinação da reta e representa a diferença de escala entre as respostas dos sensores. Esses parâmetros não foram definidos arbitrariamente, mas determinados a partir dos pares de observações utilizados no processo de harmonização.

Após a obtenção dos coeficientes, os valores dos índices espectrais provenientes do CBERS-4/MUX foram convertidos para a referência adotada na série multissensor. Esse procedimento teve como finalidade reduzir diferenças sistemáticas associadas às características próprias dos sensores, evitando que uma alteração decorrente da mudança

de sensor fosse interpretada como alteração temporal da vegetação. Os valores originais foram preservados para fins de rastreabilidade de dados, enquanto os valores harmonizados foram utilizados na construção da série temporal integrada.

Após a harmonização, as observações foram ordenadas cronologicamente de acordo com as datas reais de aquisição, não sendo criados valores artificiais para preencher períodos sem imagens válidas, preservando a origem e a data de cada observação.

4.2.8. SUAVIZAÇÃO DA SÉRIE TEMPORAL

Mesmo após a harmonização, oscilações pontuais podem permanecer entre observações sucessivas. Para reduzir a influência dessas oscilações e evidenciar a tendência temporal da cultura, foi aplicada a suavização exponencial, conforme a equação a seguir:

$$I_t^s = \alpha I_t + (1 - \alpha) I_{t-1}^s$$

em que I_t^srepresenta o índice suavizado no instante t, $I_t$corresponde ao valor da observação atual, I_{t-1}^sao valor suavizado anterior e αao fator de ponderação da observação atual.

O procedimento combina a observação atual com o valor suavizado anterior, permitindo reduzir oscilações pontuais sem desconsiderar a trajetória temporal da cultura. Os valores espectrais originais foram preservados na base de dados, enquanto os valores suavizados foram utilizados como apoio à interpretação da tendência temporal.

4.2.9. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO

A construção do modelo de predição do Açúcar Total Recuperável (ATR) foi fundamentada na integração dos dados espectrais obtidos por sensoriamento remoto com os resultados laboratoriais registrados por ocasião da colheita da cana-de-açúcar. O procedimento teve como finalidade estabelecer relação quantitativa entre o comportamento temporal da vegetação e a qualidade tecnológica da matéria-prima, permitindo estimar o ATR a partir das informações obtidas pelas imagens orbitais.

Para essa finalidade, foram utilizadas observações provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX, organizadas cronologicamente de acordo com as datas efetivas de aquisição. As imagens foram processadas para a obtenção dos índices espectrais NDVI e GNDVI, constituindo séries temporais representativas das alterações da resposta espectral da cultura durante o período anterior à colheita.

Inicialmente, foi realizada uma análise comparativa entre os índices NDVI e GNDVI, considerando o comportamento de cada índice ao longo das séries temporais. Essa comparação teve como finalidade identificar o índice mais adequado à representação das alterações espectrais da cana-de-açúcar no período de maturação. Para essa avaliação, foi utilizado o desvio-padrão das observações de cada índice nos talhões estudados, conforme apresentado na Tabela 4.

Talhão	Registros	Desvio-padrão NDVI	Desvio-padrão GNDVI	Menor dispersão
6	15	0,0712	0,0489	GNDVI
11	9	0,0684	0,0447	GNDVI
28	16	0,1611	0,1198	GNDVI
41	15	0,0558	0,0535	GNDVI
55	17	0,0892	0,0627	GNDVI
59	13	0,1932	0,1847	GNDVI
60	13	0,1974	0,1774	GNDVI
61	13	0,0307	0,0318	NDVI
62	12	0,0394	0,0366	GNDVI
66	9	0,0274	0,0225	GNDVI
84	13	0,0711	0,0545	GNDVI

Tabela 4 – Comparação da dispersão temporal dos índices NDVI e GNDVI nos talhões avaliados. Fonte: Elaborado pelo autor com base dos dados espectrais processados (2026).

A análise comparativa demonstrou que o GNDVI apresentou menor dispersão temporal em dez dos onze talhões avaliados, correspondendo a 90,91% das áreas analisadas. Esse comportamento evidenciou maior estabilidade temporal do GNDVI na maioria dos talhões, constituindo um dos critérios para sua seleção como índice de referência na construção do modelo matemático de predição do ATR. O talhão 61

constituiu a única exceção, apresentando desvio-padrão ligeiramente inferior para o NDVI (0,0307) em comparação ao GNDVI (0,0318). Essa particularidade é examinada na seção de Resultados e Discussão, considerando as condições agronômicas observadas no referido talhão.

Embora ambos os índices tenham sido empregados na caracterização espectral da cultura, o modelo quantitativo de estimativa do ATR foi desenvolvido exclusivamente com variáveis derivadas do GNDVI. O NDVI permaneceu como indicador complementar do vigor vegetativo, utilizado para acompanhamento e comparação das respostas espectrais, não integrando a equação de regressão. Ressalta-se que a menor dispersão temporal não representa, isoladamente, maior capacidade preditiva, sendo necessária a associação das características espectrais aos valores laboratoriais de ATR.

A integração das observações provenientes de diferentes sensores exigiu atenção às particularidades espectrais e radiométricas de cada sistema orbital. Os dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-9 foram obtidos a partir de produtos HLS, enquanto as observações do CBERS-4/MUX foram compatibilizadas com a referência adotada para a série temporal integrada. Esse procedimento buscou reduzir diferenças sistemáticas entre sensores que poderiam introduzir descontinuidades artificiais na interpretação da evolução espectral da cultura.

Para reduzir a influência de oscilações pontuais provocadas por diferenças entre observações consecutivas, condições atmosféricas residuais ou características específicas dos sensores, o sistema utilizou também valores suavizados dos índices. Os valores espectrais originalmente observados foram preservados na base de dados, enquanto a série suavizada foi empregada para auxiliar na identificação da tendência predominante da cultura.

A interpretação do avanço da maturação foi fundamentada na evolução temporal da resposta espectral da cana-de-açúcar, considerando a magnitude dos índices e as alterações ao longo do período monitorado. Não foi adotado um valor absoluto de NDVI ou GNDVI como limite universal de maturação, uma vez que a resposta espectral pode variar conforme a variedade cultivada, o desenvolvimento vegetativo e as condições ambientais. Dessa forma, a redução progressiva do GNDVI após o período de maior vigor vegetativo foi considerada indicativo da evolução da cultura em direção à maturação, desde que observada de maneira consistente na série temporal. Alterações isoladas não foram interpretadas como evidência suficiente para caracterizar mudança do estágio de desenvolvimento.

Para representar a variação espectral durante o período de monitoramento, foi considerada a diferença entre as observações suavizadas do GNDVI:

$$\Delta GNDVI = GNDVI_final^{s} - GNDVI_inicial^{s}$$

em que $GNDVI_final^{s}$ e $GNDVI_inicial^{s}$ representam, respectivamente, os valores suavizados do índice correspondente à observação final e inicial do período analisado. Valores negativos indicam redução do GNDVI, enquanto valores positivos representam aumento da resposta espectral.

A construção da base de modelagem considerou o pareamento entre as características espectrais extraídas das séries temporais de cada talhão e o respectivo valor de ATR determinado laboratorialmente por ocasião da colheita. Essa associação permitiu relacionar o comportamento espectral observado antes da colheita com a qualidade tecnológica efetivamente determinada na matéria-prima. Como os valores laboratoriais estavam disponíveis apenas na ocasião da colheita, não foram atribuídos valores de ATR às observações orbitais intermediárias.

Os índices espectrais não representam diretamente a quantidade de açúcar presente nos colmos. Portanto, não foi estabelecida relação de conversão direta entre valores isolados de GNDVI e valores de ATR. A estimativa foi fundamentada na relação empírica entre as características temporais do GNDVI e os valores laboratoriais correspondentes. Nesse procedimento, o ATR determinado em laboratório constituiu a variável dependente, enquanto as características espectrais foram utilizadas como variáveis independentes.

Para representar a condição espectral próxima à colheita, foi considerado o comportamento médio do GNDVI harmonizado no período de aproximadamente 45 dias anteriores à data de referência, denominado G_{45}:

$$G_{45} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} G\,NDVI_{H,i}$$

em que $GNDVI_{H,i}$representa cada observação harmonizada disponível no período de aproximadamente 45 dias e $n$corresponde ao número de observações válidas.

Além da condição espectral média, foi considerada a evolução recente do índice por meio da variação do GNDVI harmonizado durante aproximadamente 60 dias:

$$\Delta G_{60} = GNDVI(H,final) - GNDVI(H,inicial)$$

em que GNDVI(H,final) e GNDVI(H,inicial) representam, respectivamente, os valores harmonizados correspondentes à observação final e inicial disponíveis no intervalo analisado. Valores negativos de ΔG_{60} indicam redução do índice, enquanto valores positivos representam aumento da resposta espectral.

A combinação dessas variáveis permite representar, simultaneamente a condição espectral da cultura próxima à colheita e a direção da evolução temporal. A relação entre essas características e os valores laboratoriais de ATR foi estabelecida por meio de um modelo de regressão linear múltipla, representado pela seguinte expressão:

$$ATR_est = \beta_0 + \beta_1 \times G_{45} + \beta_2 \times \Delta G_{60}$$

em que ATR_est representa o ATR estimado pelo modelo; β_0 corresponde ao intercepto da regressão; β_1 representa o coeficiente associado à condição espectral média G_{45}; e β_2 corresponde ao coeficiente relacionado à variação temporal ΔG_{60}.

A regressão é classificada como linear múltipla por relacionar uma variável dependente, representada pelo ATR laboratorial, a duas variáveis independentes derivadas do comportamento temporal do GNDVI. Dessa forma, a estimativa considera tanto a condição espectral média da cultura quanto a evolução recente, sem utilizar diretamente o NDVI como variável explicativa.

Os coeficientes β_0, β_1 e β_2 não foram estabelecidos previamente nem definidos a partir de um valor fixo de ATR. Esses coeficientes foram determinados pelo método dos mínimos quadrados ordinários, utilizando os pares de informações espectrais e laboratoriais disponíveis para o ajuste. Nesse procedimento, os parâmetros são determinados de maneira a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores de ATR observados e aqueles estimados pelo modelo.

A metodologia proposta permitiu estabelecer uma relação quantitativa entre o comportamento temporal do GNDVI e os valores laboratoriais de ATR, constituindo a base matemática utilizada pelo sistema computacional.

4.2.10. VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO

A avaliação do desempenho do modelo de predição do Açúcar Total Recuperável (ATR) foi realizada por meio da comparação entre os valores estimados pela regressão linear múltipla e os resultados laboratoriais obtidos por ocasião da colheita da cana-de-açúcar. Esse procedimento teve como finalidade quantificar as diferenças entre os valores observados e estimados, permitindo avaliar o desempenho do modelo em relação aos dados espectrais e laboratoriais utilizados no ajuste.

Para cada talhão avaliado, o valor de ATR estimado foi confrontado com o respectivo resultado laboratorial, considerando a mesma unidade de medida. As diferenças foram analisadas individualmente e de forma agregada, permitindo identificar a magnitude dos erros e verificar a existência de talhões com discrepâncias mais elevadas.

A avaliação foi realizada com os mesmos talhões utilizados para determinar os coeficientes da regressão. Dessa forma, os indicadores obtidos representam o desempenho do modelo sobre o conjunto de dados utilizado em seu ajuste, não constituindo uma validação independente com observações externas. Essa condição foi considerada na interpretação dos resultados, uma vez que o desempenho observado no conjunto de ajuste não garante a mesma precisão em talhões ou safras não utilizados na construção do modelo.

Para quantificar o desempenho das estimativas, foram considerados três indicadores estatísticos: o Erro Absoluto Médio (MAE), o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). Esses indicadores permitem avaliar as diferenças entre os valores estimados e observados sob perspectivas complementares.

O Erro Absoluto Médio (MAE) representa a média das diferenças absolutas entre os valores de ATR estimados e laboratoriais, sendo expresso na mesma unidade de medida do ATR:

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |ATR_{\mathrm{real},i} - ATR_{\mathrm{est},i}|$$

em que n representa o número de talhões avaliados, ATR_{real} corresponde ao valor laboratorial de ATR e ATR_{est} representa o valor estimado pelo modelo. Valores

menores de MAE indicam maior proximidade média entre as estimativas e os resultados laboratoriais.

O Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) expressa a magnitude média dos erros em termos percentuais, permitindo avaliar a diferença relativa entre os valores estimados e observados:

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{ATR_{\mathrm{real},i} - ATR_{\mathrm{est},i}}{ATR_{\mathrm{real},i}} \right|$$

Esse indicador expressa o erro percentual absoluto médio, facilitando a interpretação da precisão relativa das estimativas. Sua aplicação pressupõe valores observados de ATR diferentes de zero, condição atendida pelos registros laboratoriais utilizados no estudo.

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) representa a raiz quadrada da média dos quadrados dos erros:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(ATR_{\mathrm{real},i} - ATR_{\mathrm{est},i} \right)^2}$$

Diferentemente do MAE, o RMSE atribui maior peso às discrepâncias de maior magnitude, permitindo identificar a influência de estimativas mais distantes dos valores laboratoriais. Assim como o MAE, seu resultado é expresso na mesma unidade de medida do ATR.

Além dos indicadores agregados, foi considerada a análise individual dos erros percentuais absolutos de cada talhão, calculados pela relação:

$$E_i = \left| \frac{ATR_{\mathrm{real},i} - ATR_{\mathrm{est},i}}{ATR_{\mathrm{real},i}} \right| \times 100$$

Essa análise permitiu identificar as áreas em que as estimativas apresentaram maior proximidade com os valores laboratoriais e aquelas que apresentaram discrepâncias mais elevadas. A interpretação das discrepâncias considerou também as condições agronômicas observadas, reconhecendo que alterações no comportamento vegetativo podem interferir na relação entre os índices espectrais e a concentração de açúcares recuperáveis.

Os indicadores estatísticos foram utilizados de maneira complementar, uma vez que cada medida apresenta características distintas. Enquanto o MAE quantifica a magnitude média dos erros absolutos, o MAPE expressa essas diferenças em termos percentuais e o RMSE evidencia a influência das maiores discrepâncias. A análise conjunta dessas medidas possibilitou caracterizar o desempenho do modelo no conjunto de dados disponível.

Por fim, a avaliação considerou as limitações associadas à disponibilidade de resultados laboratoriais apenas na ocasião da colheita, à variabilidade agronômica entre talhões e à utilização de uma mesma base de dados para o ajuste e a avaliação das estimativas. Dessa forma, os resultados obtidos representam uma avaliação inicial da capacidade de ajuste do modelo, sendo necessária sua aplicação posterior a dados independentes, provenientes de outros talhões ou safras, para avaliar a capacidade de generalização para condições não utilizadas no ajuste.

4.2.11. ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema desenvolvido neste estudo foi estruturado como uma aplicação computacional de apoio à decisão agrícola, destinada à integração de dados orbitais, índices espectrais de vegetação e informações agronômicas para auxiliar na identificação do estágio de maturação da cana-de-açúcar e na estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR). Sua arquitetura foi organizada em componentes funcionais responsáveis pela interação com o usuário, pela comunicação com os serviços de dados orbitais, pelo processamento das informações espectrais, execução dos modelos de análise e apresentação dos resultados. Essa organização permite estabelecer um fluxo de processamento desde a definição da área de interesse até a disponibilização dos indicadores utilizados no acompanhamento da cultura.

A Figura 19 apresenta a arquitetura funcional do sistema, destacando os principais componentes computacionais e o fluxo de informações entre as etapas de aquisição, processamento, análise e visualização dos dados.

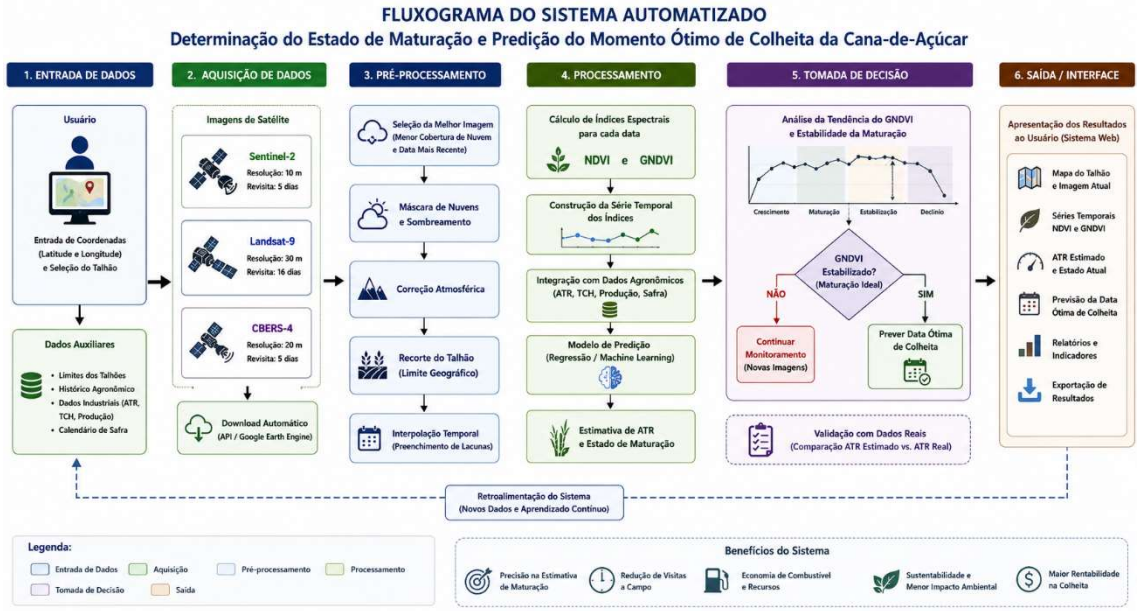

Figura 19 – Arquitetura funcional do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A primeira camada corresponde à interface web, responsável pela interação direta com o usuário. Nessa etapa são informadas as coordenadas geográficas da área de interesse e o período de consulta e, quando disponível, informações complementares sobre o talhão. Essa interface foi planejada para ser simples e objetiva, permitindo que o usuário consulte tanto a condição atual da lavoura quanto o comportamento temporal dos índices espectrais ao longo do período analisado.

A facilidade de uso constitui um aspecto importante da aplicação, considerando que ferramentas de sensoriamento remoto frequentemente exigem conhecimentos específicos para aquisição, processamento e interpretação de imagens orbitais. Nesse sentido, o sistema busca reduzir a complexidade operacional dessas atividades por meio de uma interface que centraliza os parâmetros de consulta e apresenta os resultados de maneira organizada e acessível. Dessa forma, o usuário pode consultar a condição espectral da área monitorada, acompanhar a evolução temporal dos índices de vegetação e visualizar os indicadores relacionados à maturação da cultura, sem a necessidade de executar individualmente os procedimentos de processamento das imagens.

A segunda camada é composta pelo *backend* da aplicação, desenvolvido em Python, com utilização do *framework* FastAPI, responsável por receber as solicitações da interface, organizar os parâmetros informados e coordenar as rotinas de processamento. Essa camada estabelece a comunicação entre a interface web e os serviços de sensoriamento remoto, gerenciando a recuperação das imagens, o tratamento dos dados e a execução dos procedimentos necessários à obtenção dos indicadores utilizados na avaliação da cultura.

A terceira camada compreende a aquisição e integração dos dados orbitais provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX. Para os satélites Sentinel-2 e Landsat-9 são utilizados produtos de reflectância de superfície provenientes do conjunto *Harmonized Landsat and Sentinel-2* (HLS), que incorpora procedimentos de harmonização entre esses sensores. As observações do CBERS-4/MUX são integradas conforme a disponibilidade e os procedimentos de compatibilização adotados no estudo. As cenas são selecionadas a partir das datas efetivas de aquisição e submetidas aos critérios de qualidade definidos na metodologia, sem a criação de observações artificiais para preencher intervalos sem imagens válidas.

Após a seleção das imagens, são executados os procedimentos de pré-processamento e compatibilização necessários à integração das observações provenientes dos diferentes sensores, seguidos pelo cálculo dos índices espectrais NDVI e GNDVI. Os valores obtidos são organizados cronologicamente de acordo com as datas efetivas de aquisição das imagens, para a construção da série temporal multissensor. A suavização temporal é aplicada à série harmonizada com a finalidade de reduzir oscilações pontuais e facilitar a identificação das tendências espectrais, preservando os valores das observações originais para consulta e rastreabilidade.

O módulo de análise temporal utiliza a evolução dos índices espectrais para identificar alterações no comportamento da cultura ao longo da safra. Em vez de interpretar isoladamente uma única observação, o sistema considera a trajetória temporal, permitindo caracterizar períodos de maior vigor vegetativo, estabilização e redução dos índices. Essas informações são utilizadas como apoio à classificação do estágio espectral da cultura e à identificação de possível aproximação da janela de colheita, uma vez que a resposta espectral constitui indicador indireto das condições fisiológicas da cultura.

O módulo de estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR) utiliza características extraídas da trajetória temporal do GNDVI. Conforme descrito na seção 4.2.9, são consideradas a condição espectral média no período de aproximadamente 45

dias anteriores à data de referência (G_{45}) e a variação do GNDVI ao longo de aproximadamente 60 dias anteriores à data de referência (ΔG_{60}). Essas variáveis constituem as entradas do modelo de regressão linear múltipla, cujos coeficientes foram determinados a partir da relação entre as características espectrais e os valores laboratoriais de ATR utilizados no ajuste.

Dessa forma, o ATR não é obtido por uma equivalência direta entre um valor isolado de GNDVI e determinada concentração de açúcar. O procedimento considera conjuntamente o nível espectral próximo à data de referência e a evolução temporal, permitindo que a estimativa seja derivada do comportamento da série espectral. O ATR determinado em laboratório permanece como variável de referência para o ajuste e a avaliação do desempenho do modelo, conforme os procedimentos estatísticos descritos nas seções anteriores.

Por fim, os resultados processados são retornados à interface web na forma de mapas, gráficos e indicadores numéricos. São apresentadas informações referentes à data efetiva de aquisição da imagem, ao sensor correspondente, aos valores de NDVI e GNDVI, à evolução temporal dos índices, à classificação espectral da cultura, à estimativa de ATR e à indicação da possível janela de colheita. A apresentação integrada dessas informações facilita a interpretação dos resultados e permite ao usuário acompanhar as condições da área monitorada por meio de uma única aplicação.

A arquitetura estabelece, assim, um fluxo integrado entre aquisição dos dados orbitais, processamento espectral, análise temporal, modelagem matemática e apresentação dos resultados. Ao associar esses procedimentos a uma interface de utilização simplificada, o sistema busca tornar as informações derivadas do sensoriamento remoto mais acessíveis e aplicáveis ao acompanhamento da maturação da cana-de-açúcar e ao planejamento das operações agrícolas.

4.2.12. ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE E INDICADORES AMBIENTAIS

A análise de sustentabilidade deste estudo fundamentou-se na relação entre o monitoramento orbital da cana-de-açúcar, a eficiência das operações agrícolas e o aproveitamento tecnológico da matéria-prima. Considerou-se que a utilização de informações espectrais obtidas por satélites pode contribuir para o planejamento das atividades de acompanhamento da cultura, permitindo observar a evolução das condições

vegetativas dos talhões e identificar períodos de maior interesse para avaliações agronômicas e planejamento da colheita.

Para avaliar essa contribuição potencial, foram definidos indicadores associados a duas dimensões complementares: a eficiência operacional do monitoramento agrícola e o aproveitamento potencial da matéria-prima. A primeira contempla a possibilidade de racionalização dos deslocamentos presenciais, do consumo de combustível e das emissões de gases de efeito estufa. A segunda considera a relação entre a maturação da cultura, o Açúcar Total Recuperável (ATR) e a quantidade potencial de açúcares recuperáveis.

Na dimensão operacional, o sistema desenvolvido permite acompanhar a evolução espectral da cultura por meio das séries temporais de NDVI e GNDVI, obtidas a partir de imagens dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX. Essa capacidade de monitoramento pode auxiliar na identificação de alterações no comportamento dos talhões e no direcionamento das inspeções presenciais para áreas que demandem maior atenção. Dessa forma, o sensoriamento remoto foi considerado uma ferramenta complementar aos procedimentos convencionais de acompanhamento agrícola, com potencial para reduzir deslocamentos destinados exclusivamente à observação das condições da lavoura.

O primeiro indicador estabelecido corresponde à distância potencialmente evitada pela substituição de determinados deslocamentos presenciais por consultas ao sistema, conforme a Equação a seguir:

$$\mathbf{Dev = Nev \times Dm}$$

em que Dev representa a distância potencialmente evitada, expressa em quilômetros (km); Nev corresponde ao número de deslocamentos presenciais potencialmente substituíveis pelo monitoramento remoto; e Dm representa a distância média percorrida por deslocamento, em quilômetros (km).

A aplicação desse indicador depende da identificação da frequência de visitas presenciais e das distâncias percorridas nas atividades de acompanhamento da cultura. O estudo contemplou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento orbital e a utilização de dados espectrais para acompanhamento da cana-de-açúcar, incluindo a análise da série temporal de 2025 utilizada na estimativa de ATR. Entretanto, não foram realizados levantamentos operacionais destinados a registrar os deslocamentos

presenciais que poderiam ser substituídos pela utilização do sistema. Por essa razão, o indicador foi estabelecido como referência para a avaliação da eficiência operacional, sem a determinação experimental da distância efetivamente evitada.

A partir da distância potencialmente evitada, o consumo correspondente de combustível pode ser estimado pela Equação:

$$\mathbf{Cev = Dev \times Cv}$$

em que Cev representa o consumo potencial de combustível evitado, expresso em litros (L), e Cv corresponde ao consumo médio do veículo utilizado, em litros por quilômetro (L/km).

Esse indicador estabelece a relação quantitativa entre a distância potencialmente substituída pelo monitoramento remoto e o combustível necessário para percorrê-la. Contudo, sua aplicação depende de informações sobre os veículos utilizados, as distâncias percorridas e as condições de consumo. Como o estudo não contemplou o levantamento desses parâmetros operacionais, não foi possível calcular uma economia efetiva de combustível atribuível à utilização do sistema. A equação foi mantida como referência para avaliações operacionais futuras.

O terceiro indicador corresponde às emissões potencialmente evitadas de gases de efeito estufa, estimadas a partir do consumo de combustível, conforme a Equação:

$$\mathbf{ECO_2\text{-}e = Cev \times FE}$$

em que ECO_2-e representa a quantidade potencialmente evitada de emissões de gases de efeito estufa, expressa em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO_2-e), e FE corresponde ao fator de emissão associado ao combustível utilizado, expresso em kg CO_2-e/L.

A quantificação das emissões potencialmente evitadas depende da estimativa do combustível economizado e da definição de um fator de emissão compatível com o combustível utilizado. Como não foram realizados levantamentos específicos de deslocamentos e consumo de combustível associados à utilização operacional do sistema, não foi possível determinar a redução correspondente de emissões. Assim, o indicador foi mantido como referência para avaliações futuras, sem representar uma redução ambiental efetivamente comprovada nesta pesquisa.

Além dos indicadores estabelecidos, o monitoramento espectral multitemporal apresenta potencial para contribuir com a organização das atividades agrícolas, especialmente no planejamento das inspeções de campo, na identificação de alterações vegetativas e na priorização dos talhões que demandam avaliações presenciais. A disponibilidade de informações obtidas em diferentes períodos permite acompanhar mudanças no comportamento espectral da cultura, oferecendo subsídios para o direcionamento das atividades de monitoramento e para o planejamento das operações de colheita. Dessa forma, a utilização do sistema pode favorecer uma distribuição mais criteriosa dos recursos humanos e operacionais empregados no acompanhamento das áreas agrícolas.

A redução dos deslocamentos destinados exclusivamente ao monitoramento também pode apresentar benefícios ambientais indiretos, particularmente pela possibilidade de reduzir a circulação de veículos nas áreas cultivadas. Entre esses benefícios, destaca-se a potencial diminuição das intervenções mecânicas sobre o solo, que, dependendo das condições de tráfego, umidade e manejo, podem contribuir para processos de compactação. Entretanto, o presente estudo não contemplou avaliações das propriedades físicas do solo, como densidade, resistência à penetração ou infiltração de água. Assim, possíveis efeitos sobre a compactação devem ser compreendidos como consequências potenciais de eventual redução do tráfego, sem constituir resultados comprovados experimentalmente neste estudo.

A segunda dimensão da análise de sustentabilidade está relacionada ao aproveitamento tecnológico da matéria-prima. O ATR representa a quantidade de açúcares teoricamente recuperáveis por unidade de massa de cana-de-açúcar e constitui indicador relevante para a avaliação de qualidade industrial. Nesse contexto, o acompanhamento da evolução espectral da cultura e a estimativa de ATR podem fornecer informações complementares para o planejamento da colheita, considerando a importância do estágio de maturação para o aproveitamento da matéria-prima.

Para representar a diferença de ATR entre duas condições de comparação, foi estabelecida a seguinte relação:

$$\mathbf{\Delta ATR = ATR_2 - ATR_1}$$

em que ΔATR representa a diferença de ATR entre as condições consideradas, expressa em quilogramas de ATR por tonelada de cana (kg ATR/t), enquanto ATR_1 e ATR_2 correspondem aos valores de ATR associados às respectivas condições.

A aplicação dessa relação à avaliação de possíveis ganhos decorrentes da escolha do período de colheita exigiria valores de ATR obtidos em diferentes momentos de maturação, sob condições comparáveis. Entretanto, os dados laboratoriais disponíveis para os talhões avaliados correspondem à determinação de ATR realizada na colheita. Embora o sistema tenha produzido estimativas de ATR a partir do comportamento temporal do GNDVI, essas estimativas não equivalem a determinações laboratoriais sucessivas da qualidade tecnológica da matéria-prima. Consequentemente, não foi possível demonstrar experimentalmente a diferença de ATR que resultaria da antecipação ou do adiamento da colheita.

Considerando uma determinada quantidade de cana-de-açúcar, o efeito potencial de uma diferença de ATR sobre a quantidade total de açúcares recuperáveis pode ser representado pela Equação:

$$\mathbf{\Delta QATR = Mc \times \Delta ATR}$$

em que ΔQATR representa a diferença potencial na quantidade total de ATR, expressa em quilogramas (kg), e Mc corresponde à massa de cana considerada na análise, expressa em toneladas (t).

Essa relação permite avaliar o efeito quantitativo de diferenças na qualidade tecnológica da matéria-prima sobre a quantidade potencial de açúcares recuperáveis, desde que sejam consideradas condições de comparação adequadamente definidas. No presente estudo, entretanto, a ausência de determinações laboratoriais sucessivas de ATR para os mesmos talhões impediu a quantificação de diferenças diretamente atribuíveis à escolha de períodos alternativos de colheita. Dessa forma, a equação não foi utilizada para quantificar ganhos efetivos de recuperação de açúcares decorrentes da aplicação do sistema.

A relação entre o aproveitamento da matéria-prima e a eficiência energética foi considerada a partir da importância dos açúcares recuperáveis para o processamento industrial da cana-de-açúcar, especialmente na produção de açúcar e etanol. O acompanhamento da maturação pode contribuir para a tomada de decisões relacionadas ao momento de colheita, com potencial para favorecer o aproveitamento tecnológico da matéria-prima. Entretanto, o ATR não representa diretamente a quantidade de energia produzida, sendo necessário distinguir a qualidade tecnológica da matéria-prima dos indicadores específicos de eficiência energética industrial.

A abordagem desenvolvida insere-se no contexto da agricultura digital, ao integrar informações geoespaciais, processamento computacional e séries temporais de índices espectrais para apoiar o acompanhamento da cultura. A organização de dados provenientes de diferentes sensores orbitais permite ampliar a disponibilidade de informações para a interpretação das condições vegetativas dos talhões e para o planejamento agrícola. Sob a perspectiva dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), essa aplicação apresenta alinhamento conceitual com os princípios de inovação tecnológica, produção e consumo responsáveis, eficiência no uso de recursos e ação climática, especialmente aqueles associados aos ODS 9, 12 e 13. Entretanto, essa associação não representa comprovação do cumprimento de metas específicas, mas evidencia possibilidades de aplicação da tecnologia em práticas agrícolas orientadas à sustentabilidade.

Cabe ressaltar que o monitoramento orbital não substitui integralmente as avaliações agronômicas presenciais e as análises laboratoriais da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Alterações fisiológicas, condições específicas de manejo e fatores ambientais podem influenciar o comportamento dos índices espectrais, exigindo interpretação conjunta com informações obtidas em campo. Nesse sentido, a principal contribuição do sistema está na disponibilização de informações complementares para o acompanhamento dos talhões e o planejamento das intervenções agrícolas, sem eliminar a necessidade de procedimentos convencionais de avaliação.

O estudo compreendeu o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de monitoramento orbital da cana-de-açúcar, integrando dados espectrais provenientes de diferentes sensores e informações agronômicas para o acompanhamento da cultura. Nesse contexto, a análise temporal histórica de 2025 foi utilizada na avaliação das estimativas de ATR produzidas pelo modelo desenvolvido. Entretanto, a pesquisa não contemplou levantamentos operacionais de deslocamentos, consumo de combustível e emissões, tampouco determinações laboratoriais sucessivas de ATR que permitissem comparar o aproveitamento da matéria-prima em diferentes momentos de colheita.

Dessa forma, os indicadores estabelecidos não foram utilizados para quantificar ganhos ambientais, energéticos ou produtivos durante a avaliação experimental. A inclusão na metodologia teve como finalidade definir relações mensuráveis para futuras aplicações operacionais do sistema, nas quais poderão ser integrados registros de deslocamentos, consumo de combustível, fatores de emissão, produtividade e valores laboratoriais de ATR obtidos em condições comparáveis.

A contribuição do estudo à sustentabilidade foi, portanto, analisada a partir das funcionalidades desenvolvidas e de sua aplicabilidade potencial ao planejamento agrícola. Os resultados de monitoramento espectral e estimativa de ATR fornecem suporte técnico a essa aplicação, mas não demonstram diretamente a redução de emissões, economia de combustível ou aumento da recuperação industrial de açúcares. A quantificação desses benefícios dependerá da aplicação dos indicadores propostos em condições operacionais devidamente documentadas.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 DESENVOLVIMENTO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O desenvolvimento do sistema automatizado de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar constituiu um dos principais resultados tecnológicos desta pesquisa, concretizando a integração entre sensoriamento remoto orbital, o processamento de imagens multiespectrais, a análise temporal de índices de vegetação e modelagem matemática para estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR). A aplicação foi estruturada para transformar dados orbitais provenientes de diferentes sensores em informações sistematizadas e acessíveis, destinadas ao acompanhamento das condições vegetativas da cultura e ao apoio ao planejamento da colheita.

O sistema foi implementado em ambiente web, reunindo em uma única plataforma as etapas de consulta espacial, seleção temporal, obtenção de imagens, processamento espectral e apresentação dos resultados. Essa organização permitiu disponibilizar funcionalidades de monitoramento sem exigir do usuário a execução direta de procedimentos especializados de geoprocessamento. A interface foi concebida para facilitar a utilização por produtores rurais, técnicos agrícolas e gestores, permitindo que as informações fossem consultadas a partir de parâmetros geográficos e temporais definidos pelo próprio usuário.

A interação com a plataforma inicia-se pela definição da área de interesse, mediante a inserção das coordenadas geográficas de latitude e longitude, do raio de amostragem e do intervalo de datas correspondente ao período de análise. Esses parâmetros delimitam espacial e temporalmente a consulta e orientam a seleção das imagens disponíveis para a região monitorada. A Figura 20 apresenta a tela principal do

sistema, destacando a organização dos elementos de entrada e os recursos disponibilizados para a realização das consultas.

Figura 20 – Tela principal do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A interface evidencia a integração entre os parâmetros de consulta e a representação geográfica da área monitorada. O ambiente cartográfico permite identificar espacialmente a região correspondente às coordenadas informadas, enquanto a definição do período de interesse possibilita acompanhar diferentes etapas do desenvolvimento da cultura. Essa organização constitui um resultado relevante da implementação, reunindo procedimentos de localização e consulta que, em abordagens convencionais, poderiam exigir a utilização de diferentes ferramentas computacionais.

Após a execução da consulta, o sistema realiza a seleção e o processamento das observações orbitais disponíveis, considerando imagens provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX. A integração desses sensores permite reunir registros adquiridos em diferentes datas, respeitando as características de aquisição e disponibilidade. Os resultados são organizados de acordo com as datas efetiva das imagens, permitindo identificar o sensor responsável por cada observação e acompanhar a sequência temporal das informações espectrais.

O processamento das imagens possibilita a determinação dos índices NDVI e GNDVI, utilizados para caracterizar o comportamento espectral da vegetação. Os valores

obtidos são apresentados individualmente para cada observação e integrados em representações temporais, permitindo identificar oscilações, tendências e alterações no comportamento da cultura. Essa funcionalidade representa uma das principais características operacionais da aplicação, possibilitando interpretar a evolução dos talhões com base em observações adquiridas em diferentes datas, em vez de restringir a análise a uma única imagem orbital.

Além da apresentação dos índices espectrais, o sistema incorpora procedimentos de análise temporal destinados à interpretação das condições vegetativas da cana-de-açúcar. A organização cronológica dos registros permite reconhecer períodos de maior atividade vegetativa, alterações na trajetória espectral e tendências de redução dos índices, fornecendo informações complementares à avaliação do estágio de maturação. Essas informações são utilizadas na classificação espectral da cultura e na indicação de possível janela de colheita, considerando as limitações inerentes à interpretação indireta das condições fisiológicas por sensoriamento remoto.

Outra funcionalidade implementada corresponde à estimativa do ATR por meio do modelo matemático desenvolvido na pesquisa. Diferentemente de uma interpretação baseada exclusivamente no valor instantâneo de um índice de vegetação, a estimativa considera características extraídas da trajetória temporal do GNDVI, integrando a condição espectral próxima à data de referência e a variação do índice ao longo do período analisado. A incorporação desse procedimento ao sistema permitiu disponibilizar estimativas quantitativas de ATR juntamente com as informações espectrais, ampliando a aplicação como ferramenta de apoio à avaliação da matéria-prima. A formulação do modelo e o desempenho das estimativas são apresentados e discutidos nos tópicos específicos desta seção. A Figura 21 apresenta o painel de resultados gerado pelo sistema após o processamento de uma consulta, reunindo informações espectrais e indicadores relacionados ao acompanhamento da cultura.

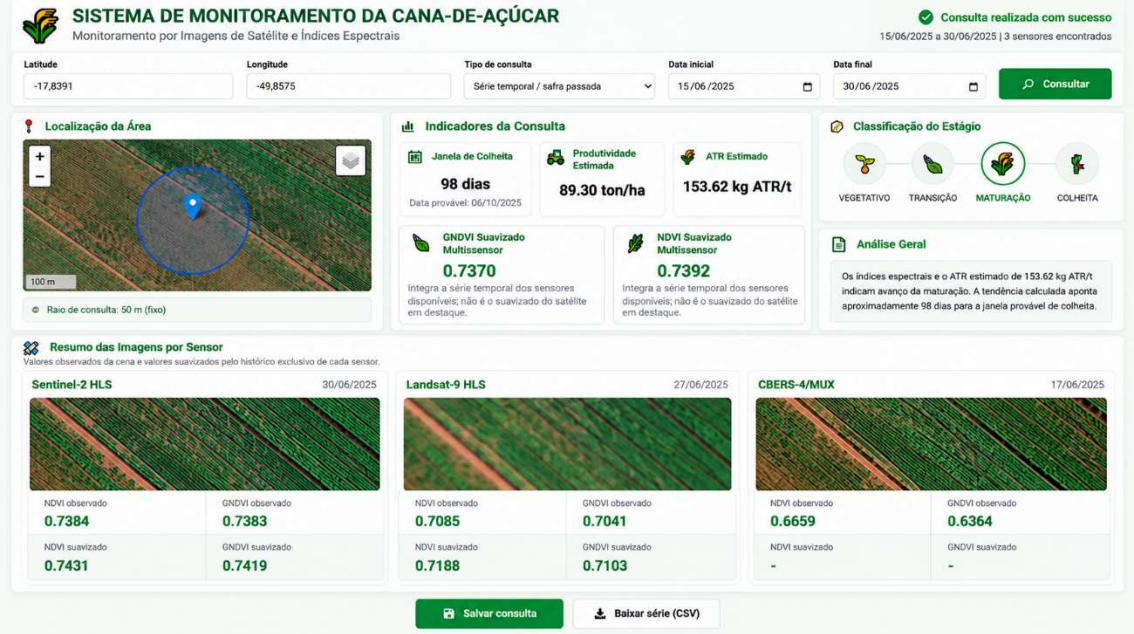

Figura 21 – Painel de resultados do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A apresentação integrada dos resultados permite consultar as imagens disponíveis, identificar as respectivas datas de aquisição, examinar os valores de NDVI e GNDVI e acompanhar a evolução temporal. A associação dessas informações às estimativas de ATR e à indicação da janela de colheita amplia as funcionalidades da aplicação, aproxima o processamento de dados orbitais das necessidades práticas de acompanhamento agrícola.

A integração entre os diferentes componentes também possibilita utilizar a mesma área de interesse em consultas realizadas para distintos períodos, favorecendo a comparação temporal das condições espectrais dos talhões. Dessa maneira, o sistema não se limita à visualização de imagens, mas organiza uma sequência de procedimentos que compreende a aquisição de informações orbitais, o processamento dos dados, a interpretação temporal e a disponibilização de indicadores para apoio à decisão.

Do ponto de vista tecnológico, o principal resultado alcançado foi a implementação de uma plataforma capaz de reunir essas funcionalidades em um ambiente único de consulta. A combinação entre diferentes sensores orbitais, índices espectrais, análise temporal e estimativa de ATR demonstra a viabilidade de integrar procedimentos de sensoriamento remoto e modelagem matemática em uma aplicação voltada ao monitoramento da cana-de-açúcar. Essa contribuição diferencia o produto desenvolvido de uma ferramenta destinada exclusivamente à visualização cartográfica ou ao cálculo isolado de índices de vegetação.

Sob a perspectiva de sua aplicação agrícola, o sistema disponibiliza informações que podem auxiliar na identificação de alterações vegetativas, na priorização de avaliações presenciais e no acompanhamento da aproximação do período de colheita. Entretanto, sua utilização deve ser compreendida como complementar às observações agronômicas e às determinações laboratoriais, uma vez que os índices espectrais representam respostas indiretas das condições fisiológicas da cultura e podem ser influenciados por fatores ambientais e de manejo.

O desenvolvimento e a implementação do sistema constituem um resultado tecnológico da pesquisa, independentemente da avaliação estatística do modelo de ATR. Enquanto a plataforma representa a contribuição tecnológica associada à integração e disponibilização das informações, as análises subsequentes permitem examinar o comportamento dos índices espectrais, a relação entre as variações temporais e o ATR e o desempenho das estimativas obtidas. Essa distinção permite avaliar tanto o produto computacional desenvolvido quanto os resultados agronômicos derivados de sua aplicação.

4.3.2 AQUISIÇÃO MULTISSENSOR E ÍNDICES ESPECTRAIS

A integração das imagens provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX constituiu um dos resultados relevantes da implementação do sistema, permitindo reunir observações espectrais adquiridas em diferentes datas para o acompanhamento da cana-de-açúcar. A utilização de múltiplos sensores ampliou a disponibilidade temporal de informações sobre os talhões, reduzindo a dependência das aquisições realizadas por uma única plataforma orbital. Essa característica mostrou-se importante para o monitoramento agrícola, considerando que a obtenção de imagens adequadas pode ser limitada pela frequência de revisita, pela cobertura de nuvens e pelos critérios de qualidade aplicado às observações.

Os resultados das consultas evidenciaram que a disponibilidade das imagens variou entre os sensores ao longo do período analisado. Em determinados intervalos de análise, foram identificadas observações provenientes de apenas um ou dois satélites, enquanto em outros períodos foi possível reunir registros das três plataformas. Essa distribuição temporal demonstrou que a composição de uma série multissensor não depende da aquisição simultânea de imagens, mas da organização cronológica de observações válidas, considerando as respectivas datas e características espectrais.

A utilização dos produtos *Harmonized Landsat and Sentinel-2* (HLS) permitiu incorporar observações de reflectância de superfície dos satélites Sentinel-2 e Landsat-9 ao conjunto de dados previamente harmonizados. As imagens do CBERS-4/MUX foram integradas mediante os procedimentos de processamento e harmonização descritos na metodologia. Dessa forma, o sistema reuniu informações provenientes de sensores com características distintas, preservando a identificação da origem de cada observação e a data efetiva de aquisição.

A participação dos sensores na composição das séries temporais apresentou características complementares. O Sentinel-2 contribuiu com observações frequentes para o acompanhamento da vegetação, enquanto o Landsat-9 possibilitou incorporar registros adicionais em datas distintas. O CBERS-4/MUX, por sua vez, contribuiu com observações adicionais ao fornecer informações espectrais complementares às provenientes dos sensores associados ao conjunto HLS. A combinação dessas fontes permitiu construir sequências temporais com maior disponibilidade de registros do que aquela condicionada exclusivamente às aquisições de um único satélite.

A partir das imagens selecionadas, foram obtidos os valores dos índices espectrais NDVI e GNDVI para as áreas monitoradas. O NDVI foi utilizado para representar alterações na resposta espectral associadas à cobertura e ao vigor da vegetação, enquanto o GNDVI forneceu informações complementares relacionadas ao comportamento espectral da cultura, especialmente por considerar a reflectância na região do verde. O cálculo de ambos os índices para as observações disponíveis permitiu estabelecer uma base comparativa para o acompanhamento dos talhões e para a avaliação posterior das variações temporais.

Entretanto, a integração de observações provenientes de diferentes sensores exige atenção às diferenças de resolução espacial, resposta espectral, geometria de aquisição e condições atmosféricas. Mesmo após os procedimentos de compatibilização, variações entre registros sucessivos não podem ser atribuídas automaticamente a mudanças fisiológicas da cana-de-açúcar. Parte dessas diferenças pode decorrer das características das imagens utilizadas ou das condições ambientais existentes no momento da aquisição. Por essa razão, a interpretação das séries temporais considerou o conjunto de observações disponíveis, considerando a origem dos registros e sua distribuição ao longo do período analisado.

A Tabela 5 apresenta a participação dos diferentes sensores na composição da série temporal multissensor, identificando os dados utilizados, os índices espectrais obtidos e a contribuição de cada plataforma para o funcionamento do sistema.

Satélite/Sensor	Dados utilizados	Índices obtidos	Participação no sistema
Sentinel-2	Reflectância de superfície	NDVI e GNDVI	Aquisições de maior frequência para acompanhamento temporal
Landsat-9	Reflectância de superfície	NDVI e GNDVI	Complementação temporal das observações
CBERS-4/MUX	Imagens multiespectrais	NDVI e GNDVI	Complementação da série com observações em datas adicionais
Integração multissensor	Observações dos três sensores organizadas cronologicamente	Série integrada de NDVI e GNDVI	Acompanhamento da evolução espectral dos talhões

Tabela 5 – Aquisição multissensor e índices espectrais. Fonte Elaborado pelo autor (2026).

A contribuição da abordagem multissensor está associada à complementaridade temporal das observações e à possibilidade de acompanhar a cultura utilizando informações obtidas por diferentes plataformas. O resultado não consiste apenas na disponibilização dos índices NDVI e GNDVI individualmente, mas na organização dessas informações em sequência temporal integrada, que permite acompanhar diferentes momentos do desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar.

Essa integração também evidenciou limitação operacional importante: a utilização de três satélites não assegura a existência de imagens válidas de todas as plataformas em qualquer intervalo de consulta. A presença de nuvens, a ausência de aquisições adequadas e as restrições de qualidade podem produzir lacunas temporais, mesmo quando diferentes fontes orbitais são consideradas. Assim, a abordagem multissensor amplia as oportunidades de observação, mas não elimina completamente a descontinuidade temporal inerente ao sensoriamento remoto óptico.

Do ponto de vista da aplicação desenvolvida, a principal contribuição dessa integração foi permitir que observações adquiridas em datas distintas fossem utilizadas conjuntamente no acompanhamento espectral dos talhões, mantendo a identificação dos sensores e a rastreabilidade dos registros. Essa organização forneceu a base necessária

para a análise do comportamento temporal dos índices de vegetação e para a extração das características espectrais utilizadas posteriormente no modelo de estimativa do ATR.

Os resultados apresentados demonstram, portanto, a viabilidade operacional da integração entre Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX no sistema desenvolvido, destacando a complementaridade das fontes de dados e a importância da organização temporal das observações. A análise das variações temporais de NDVI e GNDVI ao longo do ciclo da cultura, incluindo as diferenças de comportamento entre os talhões, é apresentada na seção seguinte, dedicada à análise espaço-temporal dos índices espectrais.

4.3.3. COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DOS ÍNDICES ESPECTRAIS

A análise espaço-temporal dos índices NDVI e GNDVI permitiu acompanhar as alterações da resposta espectral da cana-de-açúcar ao longo do período de monitoramento realizado em 2025. Para a apresentação dos resultados, foram selecionados os talhões 60, 61 e 62, por apresentarem padrões distintos de evolução espectral, representativos dos comportamentos identificados no conjunto de talhões avaliados. Essa seleção possibilitou sintetizar as diferenças temporais dos índices, evitando a repetição de análises individuais para todas as áreas monitoradas.

A Figura 22 apresenta a evolução dos índices NDVI e GNDVI nos três talhões selecionados, a partir da integração das observações dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX. As curvas representam a evolução temporal dos índices obtidos pela integração multissensor ao longo do período de acompanhamento, enquanto os símbolos identificam as leituras individuais dos sensores nas respectivas datas de aquisição.

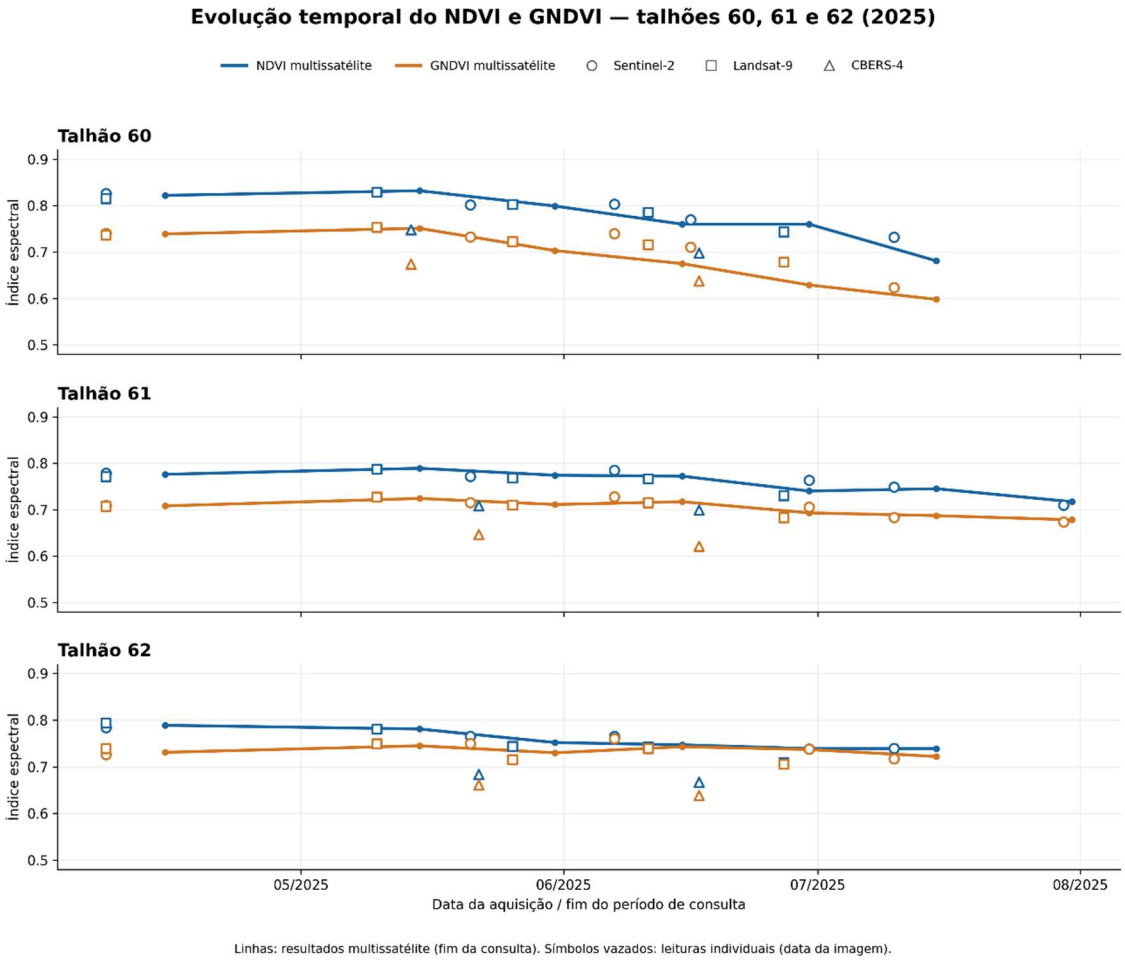

Figura 22 – Evolução temporal dos índices NDVI e GNDVI nos talhões 60, 61 e 62 (2025). Fonte: Elaborado pelo autor com dados multissensores (2026).

No talhão 60, cultivado com a variedade CTC4, observou-se redução mais acentuada dos índices espectrais, com o NDVI passando de aproximadamente 0,82 para 0,68 e o GNDVI de 0,74 para 0,60 entre abril e julho. Esse comportamento indica diminuição da resposta espectral associada à atividade vegetativa, compatível com alterações fisiológicas da cultura durante a aproximação da colheita.

O talhão 61, também cultivado com a variedade CTC4, apresentou oscilações moderadas e menor amplitude de variação. O NDVI passou de aproximadamente 0,79 para 0,72, enquanto o GNDVI variou de 0,72 para 0,68. Apesar de apresentar a mesma variedade do talhão 60, a trajetória espectral foi distinta, indicando possíveis diferenças nas condições de desenvolvimento da cultura. Nesse talhão, foi registrada a ocorrência de brotamento antes da colheita, condição que pode modificar a resposta espectral da vegetação e interferir na relação entre os índices e a maturação tecnológica.

No talhão 62, cultivado com a variedade RB127825, verificou-se maior estabilidade dos índices, especialmente do GNDVI, que permaneceu próximo de 0,73 durante grande parte do período analisado. O NDVI apresentou redução de aproximadamente 0,79 para 0,74, enquanto o GNDVI variou de 0,73 para 0,72. Esse comportamento indica menor variação espectral em comparação com os demais talhões selecionados.

A comparação dos resultados evidencia três padrões de evolução espectral: redução mais expressiva dos índices no talhão 60, variações moderadas no talhão 61 e maior estabilidade no talhão 62. Essas diferenças reforçam a importância do acompanhamento temporal para caracterizar o comportamento vegetativo da cana-de-açúcar, considerando que as alterações espectrais não ocorrem de maneira uniforme entre áreas cultivadas.

Observou-se que o NDVI apresentou valores superiores aos do GNDVI na maior parte do período analisado, embora ambos tenham registrado alterações na resposta espectral da cultura. Esse comportamento evidencia diferenças na sensibilidade dos índices às condições vegetativas, conforme discutido por Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996) e Xue e Su (2017). Esses resultados apresentam relação coma a abordagem de Leandro *et al.* (2024), que investigaram a utilização de índices espectrais no acompanhamento da maturação da cana-de-açúcar. Entretanto, enquanto aquele estudo relacionou informações espectrais a parâmetros de qualidade da cultura por meio de diferentes modelos de regressão, a presente pesquisa utilizou a evolução temporal do GNDVI como base para a estimativa do ATR.

Embora ambos os índices tenham permitido identificar diferenças no comportamento vegetativo dos talhões, a estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR) foi realizada exclusivamente a partir da evolução temporal do GNDVI, conforme o modelo matemático apresentado na metodologia. Dessa forma, a comparação entre NDVI e GNDVI contribuiu para a caracterização espectral da cultura, enquanto os registros do GNDVI forneceram as informações utilizadas na modelagem do ATR.

4.3.4. PREDIÇÃO DE ATR PELOS ÍNDICES ESPECTRAIS

A estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR) foi fundamentada na análise da série temporal do GNDVI, considerando as alterações espectrais da cana-de-açúcar ao longo do período de monitoramento, e não apenas o valor do índice em uma data

específica. Essa abordagem permitiu incorporar ao modelo informações sobre a trajetória vegetativa dos talhões, relacionando seu comportamento temporal aos valores de ATR determinados laboratorialmente no momento da colheita.

O modelo de regressão linear múltipla utilizou duas variáveis derivadas da série temporal do GNDVI: a condição espectral média nos 45 dias anteriores à data de referência (G_{45}) e a variação do índice em um intervalo aproximado de 60 dias (ΔG_{60}). A combinação dessas variáveis possibilitou considerar simultaneamente o nível espectral da vegetação e a tendência de sua variação temporal, distinguindo situações em que valores semelhantes de GNDVI poderiam corresponder a diferentes trajetórias de desenvolvimento da cultura.

Conforme estabelecido na metodologia, a relação entre as variáveis espectrais e o ATR foi representada por um modelo de regressão linear múltipla, expresso pela seguinte equação:

$$\mathbf{ATR_est = \beta_0 + \beta_1 \times G_{45} + \beta_2 \times \Delta G_{60}}$$

em que ATR_est representa o Açúcar Total Recuperável estimado; G_{45} corresponde à média dos valores harmonizados de GNDVI no período de aproximadamente 45 dias; ΔG_{60} representa a diferença entre os valores final e inicial do índice em uma janela aproximada de 60 dias; e β_0, β_1 e β_2 são os coeficientes determinados pelo ajuste da regressão aos dados laboratoriais.

A utilização da série temporal constitui um aspecto central da modelagem, a interpretação de uma leitura espectral isolada não permite caracterizar a evolução vegetativa da cultura. Ao incorporar informações de diferentes momentos do desenvolvimento, o modelo considera tanto a condição recente da vegetação quanto as alterações ocorridas anteriormente. Dessa forma, a estimativa não resulta de uma conversão direta entre determinado valor de GNDVI e uma quantidade de açúcar, mas de uma relação empírica estabelecida entre o comportamento temporal do índice e os resultados laboratoriais de ATR.

A aplicação do modelo aos talhões avaliados produziu estimativas individualizadas, abrangendo variedades e condições de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Conforme apresentado na Tabela 6, os valores estimados variaram de 75,07 a 165,17 kg ATR t^{-1}, enquanto os valores determinados laboratorialmente variaram de 70,63 a 161,33 kg ATR t^{-1}. Essa amplitude evidencia que o sistema não atribuiu um valor

constante de ATR às áreas monitoradas, produzindo resultados distintos a partir das características temporais consideradas na modelagem.

TALHÃO	VARIEDADE	ÁREA(ha)	ATR REAL	ATR ESTIMADO	ERRO ABSOLUTO
06	IACSP 95 5094	14,06	147,25	138,26	6,26 %
11	RB96 6928	20,92	70,63	75,07	5,66 %
28	RB92 8064	23,27	155,83	160,14	2,77 %
41	CTC4	14,07	97,52	97,03	0,50 %
55	RB12 7825	10,58	121,40	126,52	4,22 %
59	RB12 7825	15,95	134,61	139,98	3,99 %
60	CTC4	33,61	134,61	127,26	5,46 %
61	CTC4	24,57	149,25	165,17	10,67 %
62	RB127825	19,21	161,33	161,63	0,18 %
66	CV 7870	24,47	134,61	139,50	3,63 %
84	RB97 5952	6,67	82,36	87,29	5,99 %

Tabela 6 - Comparação entre os valores de ATR estimados pelo sistema e determinados em campo nos talhões avaliados. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Fazenda Santa Laura (2025).

As diferenças entre as estimativas podem ser observadas nos talhões 60 e 61, ambos cultivados com a variedade CTC4, que apresentaram valores estimados de 127,26 e 165,17 kg ATR t^{-1}, respectivamente. Embora compartilhem o mesmo material genético, os resultados demonstraram comportamentos distintos, evidenciando que a estimativa não foi determinada exclusivamente pela variedade cultivada. Nos talhões 55 e 59, cultivados com a variedade RB127825, também foram observadas diferenças, com estimativas de 126,52 e 139,98 kg ATR t^{-1}, respectivamente.

Os resultados também demonstraram que o modelo produziu estimativas em diferentes faixas de ATR. Nos talhões 11, 84 e 41, foram obtidos valores de 75,07, 87,29 e 97,03 kg ATR t^{-1}, enquanto os talhões 28, 61 e 62 apresentaram estimativas superiores a 160 kg ATR t^{-1}. Essa distribuição evidencia a capacidade do sistema de diferenciar as condições representadas pelas variáveis espectrais utilizadas, abrangendo áreas com diferentes níveis de ATR.

Entretanto, é importante destacar que a resposta espectral da vegetação não representa uma medida direta da concentração de sacarose nos colmos. A relação entre o comportamento temporal do GNDVI e o ATR depende do ajuste empírico realizado com

os dados laboratoriais, podendo ser influenciada por condições agronômicas específicas, como diferenças varietais, desenvolvimento vegetativo e ocorrência de brotamento.

Assim, os resultados demonstram a aplicação de um modelo de estimativa de ATR fundamentado na evolução temporal do GNDVI, que utiliza informações temporais da resposta espectral da cultura, em vez de considerar apenas observações isoladas. A avaliação da precisão das estimativas e dos desvios em relação aos valores laboratoriais é apresentada na seção seguinte, por meio dos indicadores de desempenho do sistema.

4.3.5 DESEMPENHO DO MODELO DE PREDIÇÃO

A avaliação experimental do modelo de estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR) foi realizada mediante a comparação entre os valores estimados pelo sistema e aqueles determinados laboratorialmente no momento da colheita. Foram considerados onze talhões, abrangendo variedades e condições de desenvolvimento da cana-de-açúcar, conforme apresentado na Tabela 6. Essa análise teve como finalidade verificar a correspondência entre as estimativas fundamentadas na série temporal do GNDVI e os valores laboratoriais de referência, bem como identificar as condições associadas às divergências observadas.

A avaliação considerou a abordagem temporal empregada na modelagem, na qual a estimativa do ATR não depende exclusivamente do valor de GNDVI registrado em determinada imagem, mas de características extraídas de sua evolução ao longo do período de monitoramento. A utilização da condição espectral média e da variação temporal do índice permitiu incorporar informações sobre o comportamento recente da vegetação, estabelecendo uma relação empírica com os valores de ATR determinados na colheita.

A comparação individual dos resultados demonstrou diferentes níveis de aproximação entre os valores estimados e laboratoriais. Enquanto alguns talhões apresentaram diferenças reduzidas, outros registraram desvios mais expressivos, evidenciando que a relação entre o comportamento espectral da vegetação e a maturação tecnológica da cultura pode ser influenciada pelas condições agronômicas específicas de cada área.

A Figura 23 apresenta a relação entre os valores de ATR determinados laboratorialmente e aqueles estimados pelo sistema. A representação gráfica permite visualizar a distribuição dos resultados em relação à linha de igualdade (1:1), na qual os

valores estimados correspondem exatamente aos laboratoriais. Os afastamentos em relação a essa referência representam as diferenças observadas nas estimativas individuais.

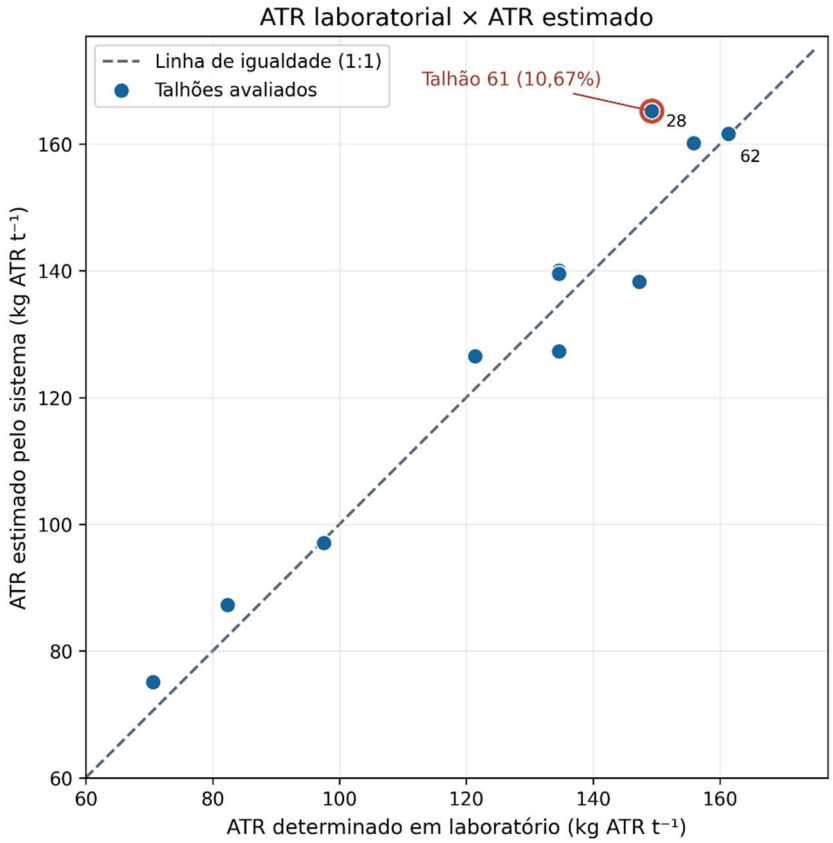

Figura 23– Comparação entre o ATR laboratorial e o estimado pelo modelo nos talhões avaliados. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para quantificar o desempenho do modelo, foram utilizados três indicadores estatísticos: erro percentual absoluto médio (MAPE), erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). Esses indicadores permitem avaliar, respectivamente, a magnitude percentual média dos desvios, a diferença absoluta média entre os resultados e a influência das observações com erros mais elevados sobre o desempenho global.

Considerando os onze pares de valores apresentados na Tabela 6, o MAPE calculado foi de 4,53%, o MAE correspondeu a 5,65 kg ATR t^{-1} e o RMSE a 6,94 kg ATR t^{-1}, conforme apresentado na Tabela 7. Esses resultados indicam aproximação entre as estimativas e os valores laboratoriais no conjunto analisado, embora a diferença entre o RMSE e o MAE evidencie a influência dos maiores desvios sobre o desempenho do modelo.

Indicador	Resultado
Número de talhões avaliados	11
MAPE	4,53%
MAE	5,65 kg ATR t^{-1}
RMSE	6,94 kg ATR t^{-1}
Talhões com erro inferior a 6%	9 de 11

Tabela 7 - Indicadores de desempenho do sistema na estimativa do ATR nos talhões avaliados. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A distribuição dos erros individuais demonstrou que oito dos onze talhões apresentaram diferenças percentuais absolutas inferiores a 6%, enquanto três registraram desvios superiores a esse percentual. Esse comportamento evidencia que a maior parte das estimativas apresentou aproximação em relação aos resultados laboratoriais, embora a precisão não tenha sido uniforme entre os talhões monitorados.

A Figura 24 apresenta os erros percentuais absolutos por talhão, permitindo identificar as áreas com maior divergência. Essa representação complementa os indicadores globais, uma vez que as médias não demonstram, isoladamente, a distribuição dos erros nem as particularidades que podem influenciar os resultados.

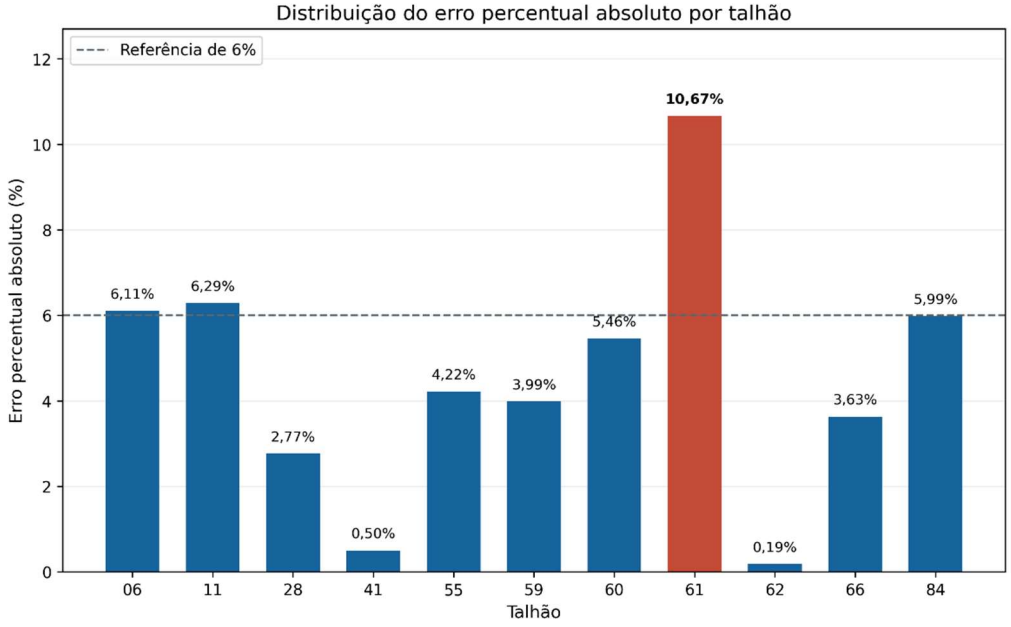

Figura 24 – Distribuição dos erros percentuais absolutos de ATR por talhão. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A maior divergência foi observada no talhão 61, cultivado com a variedade CTC4, no qual o sistema estimou 165,17 kg ATR t^{-1}, enquanto o valor determinado laboratorialmente foi de 149,25 kg ATR t^{-1}, correspondendo a superestimação de 10,67%. A diferença absoluta de 15,92 kg ATR t^{-1} representou o maior desvio registrado no conjunto experimental, tornando esse talhão particularmente relevante para a compreensão das limitações do modelo.

A investigação das condições agronômicas associadas a essa discrepância identificou a ocorrência de brotamento antes da colheita, condição identificada durante a inspeção de campo. Esse fenômeno, discutido anteriormente na seção 4.3.3, caracteriza a retomada do crescimento vegetativo e pode modificar a relação entre a resposta espectral da vegetação e o acúmulo de açúcares nos colmos.

Durante o brotamento, a formação de novos tecidos vegetativos pode provocar alterações na atividade fotossintética e na resposta espectral da cultura. Consequentemente, a trajetória do GNDVI pode apresentar variações que não correspondem proporcionalmente à evolução do ATR. Essa condição é especialmente relevante para o modelo desenvolvido, suas estimativas dependem de características extraídas da série temporal do índice, cuja interpretação está associada ao comportamento vegetativo da cultura.

A superestimação observada no talhão 61 evidencia, portanto, uma situação em que a retomada do desenvolvimento vegetativo pode interferir na relação empírica estabelecida entre o GNDVI e o ATR. Embora a ocorrência de brotamento tenha sido identificada em campo, os dados disponíveis não permitem determinar quantitativamente sua contribuição isolada para o erro registrado. Dessa forma, o fenômeno constitui uma explicação agronômica consistente para a divergência, sem excluir a possível influência de outros fatores relacionados às condições da cultura e às características das observações orbitais.

A manutenção desse talhão na avaliação é importante para representar as condições efetivamente encontradas durante a aplicação do sistema. A exclusão apenas em razão do maior erro reduziria a influência dessa observação sobre os indicadores globais e poderia produzir uma interpretação excessivamente favorável do desempenho do modelo. Assim, a análise preservou o resultado, reconhecendo sua contribuição para a identificação das limitações da abordagem proposta.

Em contrapartida, foram observadas estimativas próximas aos valores laboratoriais em outros talhões. No talhão 62, o sistema estimou 161,63 kg ATR t^{-1},

enquanto o valor determinado em campo foi de 161,33 kg ATR t^{-1}, correspondendo a diferença aproximada de 0,19%. No talhão 28, foram obtidos 160,14 kg ATR t^{-1} estimados e 155,83 kg ATR t^{-1} laboratoriais, com diferença percentual de 2,77%. Esses resultados demonstram que o modelo apresentou elevada aproximação em determinadas condições, inclusive em áreas com valores relativamente altos de ATR.

A análise conjunta também demonstrou a ocorrência de superestimações e subestimações, indicando que os desvios não se concentraram exclusivamente em uma única direção. Esse comportamento reforça a importância de considerar a variabilidade agronômica dos talhões e as particularidades de suas trajetórias espectrais na interpretação das estimativas.

Os resultados evidenciam que a utilização da série temporal do GNDVI constitui uma abordagem promissora para a estimativa empírica do ATR, permitindo obter valores próximos aos laboratoriais em parte expressiva das áreas analisadas. Entretanto, a divergência registrada no talhão 61 demonstra que a interpretação da evolução espectral deve considerar situações em que a atividade vegetativa não acompanha proporcionalmente o processo de maturação tecnológica.

Dessa forma, os indicadores obtidos caracterizam o desempenho do modelo no conjunto experimental avaliado, fornecendo uma avaliação inicial do ajuste do modelo aos dados disponíveis. Contudo, a confirmação de sua capacidade preditiva em condições externas à base analisada depende de avaliações adicionais com dados não utilizados no ajuste dos coeficientes, contemplando diferentes safras, variedades e condições de cultivo. A identificação do brotamento como condição associada à maior divergência observada representa resultado relevante para o aperfeiçoamento do sistema. A incorporação futura de informações agronômicas complementares e de mecanismos de identificação de alterações vegetativas poderá contribuir para ampliar a confiabilidade das estimativas, especialmente em situações nas quais a resposta espectral da cultura não corresponde diretamente à evolução do ATR.

4.3.6 APLICABILIDADE OPERACIONAL

Além do desempenho obtido na estimativa do ATR, os resultados evidenciaram o potencial de aplicação do sistema como ferramenta de apoio ao acompanhamento operacional dos talhões de cana-de-açúcar. A integração entre imagens orbitais, índices espectrais e informações agronômicas permite concentrar em uma única plataforma dados

que podem auxiliar técnicos, produtores e gestores no monitoramento das áreas cultivadas.

Uma das principais características operacionais do sistema é a possibilidade de realizar consultas a partir das coordenadas geográficas da área de interesse. Dessa forma, o usuário não precisa realizar diretamente o processamento das imagens de satélite ou utilizar programas específicos de geoprocessamento para obter os indicadores espectrais. As informações são processadas e apresentadas de forma integrada na interface da aplicação.

A utilização conjunta de Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX também amplia as possibilidades de acompanhamento das áreas ao longo da safra. Como os satélites possuem diferentes datas de aquisição, a abordagem multissensor permite incorporar observações realizadas em momentos distintos, aumentando a quantidade de informações disponíveis para composição da série temporal. Entretanto, essa disponibilidade permanece condicionada à frequência de revisita dos sensores, à qualidade das imagens e às condições atmosféricas.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de acompanhar a evolução do talhão por meio de sucessivas consultas. Em vez de utilizar uma observação isolada, o sistema organiza as informações espectrais ao longo do tempo, permitindo visualizar alterações no comportamento da cultura durante o período que antecede a colheita. Essa característica mostrou-se particularmente importante diante das oscilações de NDVI e GNDVI verificadas nos talhões avaliados.

A estimativa do ATR acrescenta uma informação sobre a qualidade tecnológica da matéria-prima ao acompanhamento espectral. Os resultados apresentados nas seções anteriores demonstraram que, para a maior parte dos talhões avaliados, os valores estimados permaneceram próximos daqueles determinados em campo. Dessa forma, a informação produzida pelo sistema pode ser utilizada como indicador complementar para o planejamento das operações de campo e da colheita, sem substituir a análise laboratorial quando esta for necessária para a determinação efetiva do ATR.

Do ponto de vista operacional, a plataforma também permite comparar áreas e identificar situações que mereçam maior atenção. Talhões que apresentem comportamento espectral diferente do esperado podem ser priorizados para avaliação em campo. Nesse sentido, o sistema pode contribuir não apenas para indicar áreas próximas da condição de colheita, mas também para direcionar de maneira mais seletiva as atividades de monitoramento.

Essa aplicação é particularmente relevante em propriedades constituídas por diversos talhões, nas quais o monitoramento exclusivamente presencial exige maior tempo de trabalho e deslocamento das equipes técnicas. O sensoriamento remoto permite realizar uma avaliação preliminar das áreas e utilizar as informações obtidas para orientar as verificações presenciais.

Entretanto, o sistema deve ser compreendido como uma ferramenta de apoio à decisão, e não como substituto integral das avaliações agronômicas. Condições específicas, como o brotamento observado durante o estudo, demonstram que alterações fisiológicas da cultura podem modificar a resposta espectral e exigir interpretação conjunta das informações fornecidas pela plataforma e das condições observadas no campo.

4.3.7 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

O potencial de contribuição do sistema para a eficiência energética e a sustentabilidade está associado à utilização de informações obtidas por sensoriamento remoto como suporte ao planejamento da colheita da cana-de-açúcar. Em complemento às avaliações baseadas no calendário agrícola e em observações pontuais, o sistema permite acompanhar temporalmente os talhões, analisar a evolução dos índices NDVI e GNDVI e estimar o Açúcar Total Recuperável (ATR), fornecendo informações adicionais sobre a condição da matéria-prima antes da colheita.

Nesse contexto, a eficiência energética não deve ser compreendida apenas como redução direta do consumo de eletricidade ou combustível. Neste estudo, ela está relacionada ao potencial de melhoria no aproveitamento tecnológico da matéria-prima, considerando que a cana-de-açúcar é utilizada para a produção de açúcar, etanol e bioenergia. Dessa forma, o acompanhamento da maturação e da evolução do ATR pode contribuir para que o planejamento da colheita considere não somente a quantidade de biomassa disponível, mas também a qualidade tecnológica.

A relação entre o sistema e esse aproveitamento pode ser representada pela seguinte sequência:

Monitoramento orbital → análise temporal de NDVI/GNDVI → estimativa do ATR → avaliação da condição do talhão → apoio ao planejamento da colheita → melhor aproveitamento potencial da matéria-prima.

Essa abordagem integra informações espaciais e temporais ao processo de tomada de decisão, permitindo acompanhar individualmente as áreas avaliadas e identificar diferenças em seu comportamento espectral. Dessa forma, o monitoramento não se limita à observação de uma condição pontual da cultura, mas incorpora a evolução ao longo do período analisado.

Os resultados obtidos fornecem suporte para essa aplicação. Entre os 11 talhões avaliados, nove apresentaram erro inferior a 6% entre o ATR estimado e o determinado em campo, enquanto o erro percentual absoluto médio (MAPE) foi de 4,53%. Esses resultados não representam diretamente ganho energético, mas demonstram que, nas condições avaliadas, o sistema apresentou capacidade de fornecer estimativas de ATR que podem ser utilizadas como informação complementar ao planejamento agrícola.

4.3.8. CONTRIBUIÇÕES AMBIENTAIS E OPERACIONAIS

As contribuições ambientais e operacionais do sistema desenvolvido estão relacionadas à utilização do sensoriamento remoto como ferramenta complementar ao monitoramento convencional da cana-de-açúcar. A integração de imagens orbitais, séries temporais de índices espectrais e estimativas de Açúcar Total Recuperável (ATR) permite reunir informações sobre o comportamento espectral da cultura que podem subsidiar o planejamento das atividades agrícolas e a utilização mais direcionada dos recursos operacionais.

Entre os resultados obtidos, destaca-se a capacidade do sistema de reunir observações provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX, organizando os valores de NDVI e GNDVI em séries temporais. Essa funcionalidade possibilitou acompanhar alterações espectrais dos talhões durante o período de monitoramento, ampliando a disponibilidade de informações para o acompanhamento da evolução vegetativa da cultura. A utilização de diferentes sensores também contribuiu para ampliar as oportunidades de aquisição de dados, embora a continuidade das observações permaneça condicionada à disponibilidade e à qualidade das imagens.

Sob a perspectiva operacional, a principal contribuição consiste na possibilidade de realizar avaliações preliminares das áreas agrícolas sem exigir inspeções presenciais em toda a etapa do monitoramento. O acompanhamento das séries temporais permite identificar alterações no comportamento espectral dos talhões e reconhecer situações que

demandem investigação complementar. Dessa forma, as informações disponibilizadas pelo sistema podem auxiliar na priorização das inspeções de campo, direcionando o acompanhamento presencial para áreas que apresentem condições distintas das esperadas.

Essa aplicação torna-se particularmente relevante diante dos resultados observados no talhão 61, no qual a ocorrência de brotamento antes da colheita esteve associada a uma divergência entre o ATR estimado e o valor determinado laboratorialmente. Embora a identificação agronômica do fenômeno tenha exigido avaliação presencial, o comportamento espectral desse talhão demonstra a importância de interpretar as séries temporais em conjunto com informações de campo. Assim, o sistema não substitui as inspeções agronômicas, mas pode contribuir para sua organização e direcionamento.

A possibilidade de racionalizar as atividades de monitoramento também apresenta implicações ambientais. A realização de inspeções presenciais envolve deslocamentos de equipes técnicas, utilização de veículos e consumo de combustíveis. Nesse contexto, o emprego de informações orbitais para o acompanhamento preliminar das áreas pode contribuir para reduzir deslocamentos destinados exclusivamente à observação da cultura, com potencial de diminuir o consumo de combustível e as emissões associadas a essas operações.

Entretanto, esses benefícios não foram quantificados experimentalmente. Durante a aplicação do sistema, não foram realizadas medições comparativas do número de deslocamentos, das distâncias percorridas, do consumo de combustível ou das emissões de gases de efeito estufa. Portanto, a contribuição ambiental identificada corresponde a uma possibilidade operacional decorrente da utilização do monitoramento remoto, cuja magnitude dependerá das condições de aplicação e da efetiva substituição ou reorganização das atividades presenciais.

Outro aspecto relevante está relacionado ao planejamento da colheita. A estimativa do ATR baseada na evolução temporal do GNDVI fornece uma informação complementar sobre a condição tecnológica da matéria-prima, que pode ser considerada juntamente com critérios agronômicos, industriais e logísticos na definição das operações agrícolas. A disponibilidade dessas estimativas apresenta potencial para apoiar decisões relacionadas ao aproveitamento da cana-de-açúcar, embora não permita afirmar, isoladamente, que ocorreram ganhos efetivos de rendimento industrial ou eficiência energética.

A integração dessas funcionalidades demonstra que a contribuição do sistema para a sustentabilidade não está restrita à redução potencial de deslocamentos. Ela também envolve a organização de informações espaciais e temporais, a identificação de condições que demandem atenção agronômica e o apoio ao planejamento das operações de colheita. Nesse sentido, o sistema integra ao no contexto da agricultura digital transformando dados orbitais em informações aplicáveis à gestão agrícola.

Do ponto de vista ambiental, a eventual redução de deslocamentos e intervenções exclusivamente destinadas ao monitoramento poderá contribuir para a racionalização do uso de combustíveis e de outros recursos operacionais. Entretanto, efeitos adicionais, como a diminuição do tráfego de máquinas nos talhões e possíveis benefícios à conservação das propriedades físicas do solo, dependem de mudanças efetivas nas práticas de manejo e não foram avaliados diretamente nesta pesquisa.

Dessa forma, os resultados permitem identificar contribuições operacionais efetivamente demonstradas, relacionadas à integração multissensor, ao acompanhamento temporal da cultura e a obtenção de estimativas de ATR fundamentadas na evolução temporal do GNDVI, bem como benefícios ambientais potenciais associados à utilização dessas informações. A quantificação de eventuais reduções no consumo de combustível, nas emissões e em outros impactos ambientais deverá ser realizada em estudos posteriores, mediante comparação entre procedimentos convencionais de monitoramento e operações apoiadas pelo sistema desenvolvido.

4.3.9 ANÁLISE FINANCEIRA DA OTIMIZAÇÃO DA COLHEITA

Além das contribuições relacionadas à eficiência energética e à sustentabilidade, a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar apresenta implicações econômicas para o produtor, uma vez que o Açúcar Total Recuperável (ATR) constitui um dos parâmetros utilizados na remuneração da matéria-prima entregue à unidade industrial. Dessa forma, diferenças na quantidade de ATR obtida por tonelada de cana podem refletir diretamente no valor econômico da produção.

Para a análise financeira, foram utilizados os valores de ATR determinados em campo nos talhões da Fazenda Santa Laura durante a safra de 2025 e os valores mensais divulgados pelo Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol dos Estados de Alagoas e Sergipe (CONSECANA-AL/SE). Nesse modelo, é adotada como

referência comercial a cana-padrão contendo 114,09 kg de ATR por tonelada de cana (kg ATR/t).

Embora a quantidade de ATR utilizada para caracterizar a cana-padrão permaneça em 114,09 kg ATR/t, o valor monetário varia de acordo com o preço do quilograma de ATR estabelecido para cada período. Em abril de 2025, por exemplo, o preço líquido de 1 kg de ATR foi de R$ 1,4644, correspondendo ao valor líquido de R$ 167,0734 por tonelada de cana-padrão. Nos meses seguintes, os valores da tonelada de cana-padrão utilizados na análise foram de R$ 172,1618 em maio, R$ 163,0917 em junho, R$ 135,1282 em julho, R$ 156,3718 em agosto e R$ 173,2685 em setembro.

A utilização de valores mensais é importante porque permite considerar a variação da referência econômica ao longo da safra, evitando comparar talhões colhidos em períodos diferentes utilizando um único valor monetário. Assim, para cada talhão, a análise considerou o período em que ocorreu a colheita, a quantidade de cana produzida e o ATR determinado naquele momento. A Tabela 8 apresenta os resultados econômicos obtidos a partir dessa comparação.

MÊS DE COLHEITA	TALHÃO	ATR REAL	TC POR TALHÃO	VALOR 114,09 KG DE ATR/TON	VALOR TALHÃO	VALOR ATR PADRÃO (114,09)	RESULTADO
ABRIL	11	70,63	1351,43	167,0734	139.779,18	225.788,00	- 86.008,82
MAIO	84	82,36	646,99	172,1618	80.408,72	111.386,96	- 30.978,24
JUNHO	06	147,25	908,28	163,0917	191.187,38	148.132,93	43.054,45
JULHO	41	97,52	908,92	135,1282	104.982,70	122.820,72	- 17.838,02
JULHO	66	134,61	2079,95	135,1282	331.610,76	281.059,90	50.550,86
AGOSTO	62	161,33	1239,05	156,3718	273.977,37	193.752,48	80,224,89
SETEMBRO	28	155,83	1256,58	173,2685	297.380,99	217.725,73	79.655,26
SETEMBRO	55	121,40	1388,10	173,2685	255.924,25	240.514,00	15.410,25
SETEMBRO	59	134,61	1515,25	173,2685	309.765,90	262.545,09	47.220,81

Tabela 8 - Resultado econômico dos talhões em função do ATR obtido na colheita e da referência de cana-padrão. Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Fazenda Santa Laura (2025) e dos valores de referência do CONSECANA-AL/SE (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 8 evidenciam diferenças econômicas importantes entre os talhões em função da quantidade de ATR determinada na colheita. Os talhões 11 e 84, colhidos respectivamente em abril e maio, apresentaram ATR de 70,63 e 82,36 kg ATR/t, valores inferiores à referência de 114,09 kg ATR/t. Nessas condições, foram observadas diferenças negativas de R$ 86.008,82 e R$ 30.978,24, respectivamente, quando comparadas aos valores correspondentes à cana-padrão.

Comportamento diferente foi observado nos talhões que apresentaram ATR superior à referência. O talhão 62, colhido em agosto, apresentou ATR de 161,33 kg ATR/t e resultado positivo de R$ 80.224,89 em relação à referência. O Talhão 28, com ATR de 155,83 kg ATR/t, apresentou diferença positiva de R$ 79.655,26, enquanto o Talhão 59, com 134,61 kg ATR/t, apresentou resultado positivo de R$ 47.220,81.

Os resultados também mostram que o mês de colheita, isoladamente, não determina o desempenho econômico. Os talhões 41 e 66, ambos colhidos em julho, exemplificam essa situação. O talhão 41 apresentou ATR de 97,52 kg ATR/t, inferior à cana-padrão, resultando em diferença negativa de R$ 17.838,02. No mesmo período, o Talhão 66 apresentou 134,61 kg ATR/t, superior à referência, correspondendo a uma diferença positiva de R$ 50.550,86. Essa comparação evidencia a importância de considerar a condição específica de cada talhão, e não somente o período do calendário agrícola.

Considerando os nove talhões incluídos na análise financeira, a soma das diferenças positivas e negativas apresentadas na Tabela 8 resultou em saldo positivo aproximado de R$ 179.835,44 em relação ao cenário de referência. Esse valor deve ser interpretado como resultado da comparação econômica entre o ATR efetivamente obtido nos talhões e a cana-padrão de 114,09 kg ATR/t, considerando os respectivos valores monetários utilizados em cada período. Portanto, não representa receita adicional diretamente gerada pelo sistema de sensoriamento remoto.

A relação dessa análise com o sistema desenvolvido encontra-se no suporte que o monitoramento pode fornecer ao planejamento da colheita. As séries temporais de NDVI e GNDVI e a estimativa do ATR permitem acrescentar informações sobre a condição dos talhões antes da colheita. Dessa forma, diferenças como aquelas observadas na Tabela 6 demonstram a relevância econômica da qualidade tecnológica da matéria-prima e reforçam a importância de ferramentas capazes de acompanhar a evolução.

Nesse sentido, o sistema não determina isoladamente quando um talhão deve ser colhido, uma vez que a decisão também depende de fatores agronômicos, climáticos e

operacionais. Sua contribuição consiste em fornecer informações adicionais que podem auxiliar o planejamento e permitir que a condição de maturação e a estimativa do ATR sejam consideradas juntamente com esses demais fatores.

A análise financeira complementa, portanto, as dimensões agronômica, energética e ambiental discutidas anteriormente. O acompanhamento da maturação não está relacionado apenas à identificação das condições da cultura, mas também ao valor econômico associado à qualidade da matéria-prima. A integração dessas informações reforça o potencial do sistema desenvolvido como ferramenta de apoio à tomada de decisão no planejamento da colheita da cana-de-açúcar.

4.3.10. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

Embora os resultados obtidos evidenciem a aplicabilidade do sistema desenvolvido para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar e a estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR), algumas limitações metodológicas, experimentais e operacionais devem ser consideradas na interpretação dos resultados e na aplicação da ferramenta em diferentes condições de produção.

Uma das limitações está relacionada à disponibilidade temporal das imagens orbitais. O sistema integra dados dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX, cujas aquisições ocorrem em datas distintas e estão sujeitas a restrições decorrentes da cobertura de nuvens e de outras condições que comprometem a qualidade das observações. Embora a integração multissensor amplie as oportunidades de monitoramento, não assegura a obtenção de imagens válidas em intervalos regulares ou a ocorrência simultânea de observações dos três sensores. Essas condições podem produzir descontinuidades nas séries temporais e limitar o acompanhamento de alterações espectrais em determinados períodos.

As diferenças entre os sensores também representam um aspecto relevante. As distintas resoluções espaciais, características espectrais e frequências de aquisição exigem cuidados na integração e na interpretação dos dados, especialmente quando observações provenientes de diferentes plataformas são utilizadas para caracterizar a evolução de um mesmo talhão. Mesmo com os procedimentos de processamento adotados, diferenças espectrais residuais entre os sensores podem interferir na continuidade das séries temporais e, consequentemente, nas informações utilizadas pelo modelo de estimativa do ATR.

Outra limitação está relacionada à influência de condições agronômicas e fisiológicas sobre os índices espectrais. O comportamento observado no talhão 61, no qual foi identificada a ocorrência de brotamento antes da colheita, evidencia que alterações na atividade vegetativa podem modificar a resposta espectral da cultura sem representar necessariamente aumento proporcional no acúmulo de sacarose. Nesse talhão, a divergência de 10,67% entre o ATR estimado e o valor laboratorial demonstra a necessidade de interpretar os resultados em conjunto com informações agronômicas, considerando também outras possíveis fontes de variação associadas às características das imagens e às condições de amostragem.

Uma limitação experimental particularmente importante refere-se à disponibilidade de dados laboratoriais de ATR. As determinações utilizadas como referência corresponderam ao momento da colheita, não tendo sido realizadas análises laboratoriais sucessivas durante todo o período de maturação de cada talhão. Dessa forma, embora as séries temporais do GNDVI tenham permitido caracterizar a evolução espectral da cultura, a avaliação quantitativa das estimativas de ATR ficou restrita vinculada aos valores laboratoriais obtidos na colheita. Consequentemente, os resultados não permitem verificar diretamente a precisão das estimativas em todas as etapas intermediárias do processo de maturação.

O conjunto experimental também constitui uma limitação quanto à abrangência dos resultados. A avaliação foi realizada com dados de onze talhões da Fazenda Santa Laura, para os quais foram comparados os valores estimados e laboratoriais de ATR. O erro percentual absoluto médio (MAPE) foi de 4,53%, com oito dos onze talhões apresentando erros inferiores a 6%. Embora esses resultados indiquem desempenho favorável nas condições avaliadas, não asseguram a manutenção da mesma precisão em outras propriedades, variedades, safras ou condições edafoclimáticas. A ampliação da aplicação do modelo requer, portanto, avaliações adicionais que permitam verificar sua capacidade de generalização.

Em relação à eficiência energética e à sustentabilidade, as contribuições identificadas também apresentam limitações de natureza experimental. Não foram realizadas medições diretas de redução de deslocamentos, consumo de combustível, emissões de gases de efeito estufa ou impactos físicos sobre o solo decorrentes da utilização do sistema. Assim, os benefícios ambientais discutidos representam possibilidades associadas à racionalização do monitoramento agrícola, cuja quantificação dependerá de avaliações comparativas em condições operacionais.

Essas limitações reforçam que o sensoriamento remoto deve ser compreendido como ferramenta complementar às avaliações agronômicas e laboratoriais. A interpretação de alterações espectrais, a identificação de condições fisiológicas específicas e a confirmação da qualidade tecnológica da matéria-prima continuam dependendo de informações obtidas diretamente nas áreas de cultivo.

Como perspectiva de continuidade, destaca-se a ampliação da base experimental, incorporando maior número de talhões, variedades, ciclos produtivos e safras. A inclusão de áreas localizadas em diferentes regiões permitirá investigar a estabilidade das relações entre o comportamento temporal do GNDVI e o ATR, além de identificar possíveis necessidades de calibração em função das condições de cultivo. A validação com conjunto de dados independentes será necessária para avaliar a capacidade de generalização do modelo.

Outra perspectiva prioritária consiste na realização de campanhas de campo com determinações laboratoriais de ATR em diferentes momentos do ciclo de maturação. A obtenção de medidas sucessivas possibilitará acompanhar diretamente a evolução da qualidade tecnológica da matéria-prima e compará-la com as alterações observadas nas séries temporais dos índices espectrais. Essa ampliação permitirá avaliar o desempenho das estimativas em diferentes estágios de maturação e investigar com maior precisão a relação temporal entre a resposta espectral da vegetação e o acúmulo de açúcares nos colmos.

A incorporação de variáveis agronômicas e ambientais também representa uma possibilidade de aprimoramento. Informações relacionadas às condições meteorológicas, ao manejo da cultura, à variedade cultivada e à ocorrência de alterações fisiológicas poderão contribuir para interpretar comportamentos espectrais que não estejam diretamente associados à maturação. Essa abordagem poderá auxiliar na identificação de situações semelhantes à observada no talhão 61 e no desenvolvimento de procedimentos capazes de reduzir a influência dessas condições sobre as estimativas de ATR.

Sob a perspectiva operacional e ambiental, estudos futuros poderão comparar o monitoramento convencional com aquele apoiado pelo sistema desenvolvido, utilizando registros de deslocamentos, distâncias percorridas, consumo de combustível e emissões associadas às atividades de acompanhamento. Essas avaliações permitirão quantificar os possíveis benefícios da utilização do sensoriamento remoto na racionalização das operações agrícolas e estabelecer indicadores objetivos de eficiência operacional e ambiental.

No âmbito econômico, o acompanhamento de novas safras poderá ampliar a análise da relação entre maturação, ATR e remuneração da matéria-prima, considerando as variações dos valores de referência utilizados na comercialização da cana-de-açúcar. Essa perspectiva poderá contribuir para investigar a aplicação das informações geradas pelo sistema no planejamento da colheita e na avaliação de diferentes cenários de aproveitamento da produção.

Dessa forma, as limitações identificadas delimitam o alcance experimental dos resultados e orientam as possibilidades de continuidade da pesquisa. O aprimoramento do sistema dependerá principalmente da ampliação das observações laboratoriais ao longo da maturação, da avaliação do modelo em conjuntos independentes e da integração de informações agronômicas complementares. Essas medidas poderão fortalecer a confiabilidade das estimativas e ampliar as possibilidades de aplicação da ferramenta no monitoramento e no planejamento da colheita da cana-de-açúcar.

4.4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema automatizado demonstrou a viabilidade de integrar imagens multiespectrais dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX para o acompanhamento temporal da cana-de-açúcar e a estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR). A utilização dos índices espectrais NDVI e GNDVI possibilitou caracterizar o comportamento vegetativo dos talhões ao longo do período de monitoramento, enquanto as variáveis derivadas da série temporal do GNDVI foram utilizadas no modelo de regressão linear múltipla para estimativa do ATR.

A integração de diferentes sensores orbitais ampliou as oportunidades de obtenção de informações espectrais, reduzindo a dependência de uma única fonte de dados. A análise temporal mostrou-se relevante para o acompanhamento da cultura, permitindo observar variações no comportamento dos índices espectrais que poderiam não ser identificadas por meio de observações isoladas. Entretanto, a disponibilidade das imagens permaneceu condicionada às características de aquisição dos sensores e às condições atmosféricas.

A avaliação das estimativas de ATR, realizada a partir da comparação com os resultados laboratoriais de onze talhões, apresentou erro percentual absoluto médio

(MAPE) de 4,53%, erro absoluto médio (MAE) de 5,65 kg ATR/t e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 6,94 kg ATR/t. Oito dos onze talhões apresentaram erros percentuais absolutos inferiores a 6%, indicando proximidade entre os valores estimados e os determinados laboratorialmente na maior parte das áreas avaliadas. Esses resultados indicam a viabilidade da abordagem no conjunto experimental avaliado.

Entretanto, a ocorrência de brotamento antes da colheita no talhão 61 evidenciou uma limitação importante da abordagem espectral. Nesse talhão, a diferença de 10,67% entre o ATR estimado e o laboratorial indicou que alterações fisiológicas associadas à retomada do crescimento vegetativo podem modificar a resposta espectral da cultura sem corresponder proporcionalmente à condição tecnológica da matéria-prima. Esse resultado reforça a necessidade de interpretar as estimativas em conjunto com informações agronômicas e confirma o caráter complementar do sistema em relação às avaliações de campo e às determinações laboratoriais.

A análise econômica evidenciou a importância do ATR na valorização da matéria-prima. Considerando os nove talhões incluídos nessa avaliação e a referência de 114,09 kg ATR/t para a cana-padrão, foram identificadas diferenças positivas e negativas no valor da produção, resultando em saldo aproximado de R$ 179.835,44 no conjunto analisado. Esse resultado expressa o efeito das diferenças de qualidade tecnológica sobre a avaliação econômica da cana-de-açúcar, não representando ganho financeiro diretamente proporcionado pela utilização do sistema. A disponibilidade de estimativas de ATR, entretanto, constitui uma informação complementar que pode auxiliar o planejamento das operações de colheita.

Em relação à eficiência energética e à sustentabilidade, a contribuição do sistema está associada principalmente à disponibilização de informações para o acompanhamento remoto dos talhões e para o planejamento das atividades agrícolas. A possibilidade de identificar alterações espectrais e direcionar avaliações presenciais apresenta potencial para racionalizar deslocamentos e recursos utilizados no monitoramento. Da mesma forma, o conhecimento da condição tecnológica da matéria-prima pode contribuir para decisões relacionadas ao seu aproveitamento industrial. Contudo, não foram mensuradas reduções efetivas no consumo de combustível, nas emissões de gases de efeito estufa ou no consumo energético das operações, razão pela qual esses benefícios permanecem caracterizados como potenciais.

Conclui-se que o sistema desenvolvido atingiu seu objetivo de integrar dados orbitais multissensores, séries temporais de índices espectrais e informações laboratoriais

em uma ferramenta de apoio ao acompanhamento da maturação e à estimativa do ATR da cana-de-açúcar. Os resultados demonstraram a aplicabilidade da abordagem nas condições estudadas, evidenciando a obtenção de estimativas próximas aos valores laboratoriais no conjunto analisado, quanto a necessidade de considerar fatores agronômicos que possam interferir na relação entre a resposta espectral e a qualidade tecnológica da cultura.

A ampliação das avaliações para diferentes safras, variedades e condições de produção, associada à obtenção de determinações laboratoriais de ATR em diferentes momentos do ciclo, constitui uma etapa necessária para investigar a capacidade de generalização do modelo e aprimorar a utilização operacional no setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Produção de cana-de-açúcar é estimada em 652,9 milhões de toneladas influenciada por boa produtividade. Brasília: CONAB, 2023. Disponível em: https://cast.conab.gov.br/post/2023-08-17_2_lev_cana/. Acesso em: 15 out. 2025.

COSTA, A. P. Aplicação de índices espectrais e aprendizado de máquina na estimativa da maturação da cana-de-açúcar utilizando imagens orbitais. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimation using remote sensing data and agrometeorological models. Engenharia Agrícola, v. 37, n. 2, p. 315–327, 2017.

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; SILVA, C. B. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento agrícola da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 8, p. 561–567, 2018.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Org.). Crop-Water Relations. New York: John Wiley & Sons, 1983. p. 445–479.

HAN, J.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, S. Remote sensing and artificial intelligence for sustainable crop monitoring and biomass estimation. Remote Sensing, v. 14, n. 18, p. 4567, 2022.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian strategies for a low-carbon bioeconomy. BioEnergy Research, v. 12, n. 3, p. 539-545, 2019. DOI: 10.1007/s12155-019-10040-5.

MONTEIRO, M. B. B. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2009.

MUNDIM, D. A. Determinação do ponto de maturação da cana-de-açúcar por meio de parâmetros tecnológicos. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

PIGNÈDE, G.; JONES, A.; MARTIN, P.; DUBOIS, C. Remote sensing applications for sustainable agricultural management and environmental monitoring. Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 24, p. 100635, 2021.

RAHMAN, M. M.; ROBSON, A. J. Satellite remote sensing and precision agriculture: opportunities and challenges for sugarcane monitoring. Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 4, p. 1–11, 2016.

RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: EDUFU, 2020. DOI: http://doi.org/10.14393/EDUFU/978-65-86084-00-9.

SILVA, R. F.; BARBOSA, M. A. Agricultura de precisão e sustentabilidade ambiental: aplicações do sensoriamento remoto no monitoramento agrícola. Revista Brasileira de Agricultura Sustentável, v. 11, n. 2, p. 45-58, 2021.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA). A indústria da cana-de-açúcar no Brasil: dados institucionais do setor sucroenergético. São Paulo: UNICA, 2020. Disponível em: https://unica.com.br/wp-content/uploads/2020/10/folder-institucional-unica-pt.pdf. Acesso em: 12 jan. 2026.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. Journal of Sensors, v. 2017, artigo 1353691, 2017. DOI: 10.1155/2017/1353691

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, v. 58, n. 3, p. 289–298, 1996. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC: NASA, 1974. v. 1, p. 309–317. Disponível em: NASA Technical Reports Server

SILVA, F. A. M. da; ASSAD, E. D.; MATTOS, A.; LUIZ, A. J. B. Variação espaço-temporal da disponibilidade hídrica climática no Estado de Goiás. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 33, n. 5, p. 605–612, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1998.v33.4897. Acesso em: 16 abr. 2026.

EMBRAPA CERRADOS. Embrapa Cerrados: conhecimento, tecnologia e compromisso ambiental. 2. ed. rev. ampl. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 43 p. (Documentos, 4). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/562683. Acesso em: 16 abr. 2026.

5. CONCLUSÃO GERAL

Esta pesquisa demonstrou a viabilidade da integração de dados de sensoriamento remoto orbital, índices espectrais de vegetação e modelagem matemática para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar e a estimativa do Açúcar Total Recuperável (ATR). A pesquisa contribuiu para o desenvolvimento de uma abordagem tecnológica voltada ao acompanhamento das condições vegetativas da cultura e ao fornecimento de informações que possam subsidiar o planejamento da colheita, considerando aspectos agronômicos, econômicos, energéticos e ambientais associados à produção sucroenergética.

A revisão bibliográfica desenvolvida no primeiro capítulo permitiu identificar os avanços científicos relacionados à utilização de imagens multiespectrais no monitoramento da cana-de-açúcar, bem como as principais limitações das metodologias empregadas na determinação de sua maturação. A análise da literatura evidenciou a importância da utilização de séries temporais, da integração de diferentes sensores e da associação entre informações espectrais e parâmetros agronômicos obtidos em campo. Esses fundamentos contribuíram para a estruturação da metodologia experimental e para o desenvolvimento do sistema computacional apresentado no segundo capítulo.

A integração de imagens provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4/MUX possibilitou ampliar as oportunidades de observação dos talhões agrícolas ao longo do período de monitoramento. A utilização de diferentes sensores reduziu a dependência de uma única fonte de dados e permitiu organizar informações espectrais em séries temporais, respeitando as características de resolução espacial, disponibilidade das imagens e diferenças espectrais entre os sensores. Essa abordagem demonstrou a aplicabilidade do monitoramento multissensor no acompanhamento das alterações vegetativas da cana-de-açúcar, embora a continuidade das observações permaneça condicionada à disponibilidade e à qualidade das imagens orbitais.

A análise dos índices NDVI e GNDVI permitiu caracterizar o comportamento espectral da cultura e identificar diferenças nas respostas ao longo do processo de maturação. A menor dispersão temporal do GNDVI, observada na maioria dos talhões avaliados contribui para justificar a seleção como índice utilizado na modelagem da estimativa doo ATR. A incorporação de características temporais desse índice possibilitou relacionar a condição vegetativa da cultura aos valores laboratoriais

determinados na colheita, estabelecendo uma abordagem quantitativa para o acompanhamento da qualidade tecnológica da matéria-prima.

A validação do modelo, realizada a partir da comparação entre os valores estimados pelo sistema e os resultados laboratoriais de onze talhões, apresentou erro percentual absoluto médio (MAPE) de 4,53%, erro absoluto médio (MAE) de 5,65 kg ATR/t e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 6,94 kg ATR/t. Esses indicadores demonstraram a capacidade do modelo de produzir estimativas próximas aos valores observados em campo para a maior parte dos talhões avaliados, evidenciando o potencial da metodologia nas condições experimentais estudadas.

Entretanto, as divergências identificadas também demonstraram que a resposta espectral da vegetação não corresponde exclusivamente ao processo de acúmulo de açúcares nos colmos. A ocorrência de brotamento no talhão 61, associada à superestimação de 10,67% do ATR, evidenciou a influência de alterações fisiológicas sobre o comportamento dos índices espectrais. Esse resultado reforça a necessidade de considerar as condições agronômicas e o histórico de desenvolvimento da cultura na interpretação das estimativas, uma vez que alterações no vigor vegetativo podem modificar a resposta espectral sem representar necessariamente aumento da qualidade tecnológica da matéria-prima.

O desenvolvimento do sistema computacional constituiu uma contribuição aplicada da pesquisa, ao integrar em um mesmo ambiente a aquisição e o processamento de imagens orbitais, a localização geográfica dos talhões, o cálculo dos índices espectrais, a análise de seu comportamento temporal e a estimativa do ATR. A automatização dessas etapas permitiu organizar informações provenientes de diferentes fontes e disponibilizá-las de maneira acessível para consultas e acompanhamento das áreas agrícolas. Dessa forma, a metodologia ultrapassou a análise isolada de imagens de satélite, estabelecendo uma estrutura integrada de processamento e interpretação de dados voltada ao apoio à decisão no setor sucroenergético.

Sob a perspectiva econômica, a análise dos resultados demonstrou a importância do ATR na valorização da matéria-prima e na avaliação das condições de colheita. Considerando a referência comercial de 114,09 kg ATR/t para a cana-padrão, a comparação dos nove talhões incluídos na avaliação financeira apresentou saldo positivo aproximado de R$ 179.835,44 em relação ao cenário de referência. Embora esse resultado não represente ganho financeiro diretamente proporcionado pelo sistema desenvolvido, evidencia a relevância econômica das diferenças de qualidade tecnológica entre os talhões

e a importância de incorporar informações relacionadas ao ATR ao planejamento das operações agrícolas.

Em relação à eficiência energética, a principal contribuição da metodologia está associada ao potencial de melhor aproveitamento da matéria-prima destinada ao processamento industrial. A identificação das condições de maturação e a estimativa do ATR podem fornecer subsídios para decisões relacionadas ao período de colheita, considerando a disponibilidade de açúcares recuperáveis e sua importância para a produção de açúcar e etanol. Nesse sentido, o aproveitamento energético deve ser compreendido não apenas em função do consumo de recursos nas operações agrícolas, mas também da qualidade tecnológica da biomassa utilizada no processo produtivo.

Quanto à sustentabilidade, o monitoramento orbital apresenta possibilidades de racionalização das atividades de acompanhamento agrícola, especialmente pela capacidade de observar extensas áreas sem a necessidade de inspeções presenciais em todas as etapas de avaliação. A utilização das informações geradas pelo sistema pode contribuir para direcionar as verificações de campo e aprimorar o planejamento operacional. Contudo, os possíveis benefícios relacionados à redução de deslocamentos, consumo de combustível e emissões atmosféricas não foram quantificados diretamente nesta pesquisa, constituindo perspectivas de aplicação que demandam avaliações específicas em condições operacionais.

As limitações identificadas durante o desenvolvimento e a validação da metodologia indicam a necessidade de ampliar a base experimental, especialmente quanto à diversidade de variedades cultivadas, condições ambientais, práticas de manejo e períodos de avaliação. A disponibilidade de determinações laboratoriais de ATR predominantemente no momento da colheita também restringe a análise direta de sua evolução durante a maturação. Nesse contexto, a obtenção de medições laboratoriais em diferentes estágios do ciclo produtivo, associada à avaliação do modelo em novas safras e conjuntos independentes de dados, representa uma etapa importante para o aprimoramento das estimativas e a investigação de sua capacidade de generalização.

Conclui-se que os objetivos da pesquisa foram atendidos no âmbito do desenvolvimento e da avaliação experimental de uma ferramenta automatizada para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar, fundamentada na integração de imagens orbitais, índices espectrais e dados laboratoriais. Os resultados demonstraram que a análise temporal do GNDVI, associada à modelagem matemática, constitui uma alternativa promissora para a estimativa do ATR, desde que consideradas as limitações

decorrentes das condições fisiológicas e agronômicas da cultura. A principal contribuição científica e tecnológica da dissertação consiste na integração dessas informações em um sistema de apoio à decisão, capaz de complementar os procedimentos convencionais de acompanhamento agrícola e estabelecer uma base metodológica para futuras aplicações relacionadas à qualidade da matéria-prima, ao planejamento da colheita, à eficiência energética e à sustentabilidade do setor sucroenergético.