

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

**AUTOMATED SYSTEM FOR DETERMINING SUGARCANE MATURATION
STAGE AND PREDICTING THE OPTIMAL HARVEST TIME USING
MULTISPECTRAL REMOTE SENSING**

Ciências Agrárias, Engenharias • 01/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/785281118](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/785281118)

Rogério Pereira Simões¹

Geraldo Andrade de Oliveira²

Jesmmer de Silveira Alves³

Josemar Alves dos Santos Júnior⁴

Leonardo Garcia Marques⁵

Lucas Peres Angelini⁶

RESUMO

O monitoramento preciso do ponto de maturação da cana-de-açúcar é fundamental para maximizar o rendimento industrial e a eficiência energética do setor sucroenergético. Este estudo apresenta um sistema automatizado de apoio à decisão baseado em imagens multiespectrais de satélites, capaz de identificar o estágio fisiológico da cultura a partir da inserção de coordenadas geográficas da área de interesse.

Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma plataforma automatizada para determinação do ponto de maturação da cana-de-açúcar utilizando imagens de satélite multiespectrais e índices de vegetação NDVI e GNDVI. A solução integra dados dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4, realizando alternância automática entre sensores para obtenção da imagem mais recente disponível. O sistema permite a inserção de coordenadas geográficas da propriedade agrícola, gerando automaticamente mapas de maturação e estimativas do período ideal de colheita. A metodologia foi calibrada utilizando dados reais de produção agrícola provenientes de séries históricas de 2020 a 2025, permitindo validar estatisticamente as relações entre índices espectrais e indicadores produtivos. Os resultados demonstram potencial significativo da abordagem para melhoria da eficiência energética, redução de custos operacionais e aumento da sustentabilidade do setor sucroenergético.

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

ABSTRACT

Accurate monitoring of sugarcane maturity is essential for maximizing industrial yield and improving energy efficiency in the

sugar-energy sector. This study presents the development of an automated platform for determining sugarcane maturity using multispectral satellite imagery and vegetation indices (NDVI and GNDVI). The system integrates Sentinel-2, Landsat-9 and CBERS-4 satellite data, automatically alternating sensors to obtain the most recent available image. Users input geographic coordinates to generate maturity maps and estimates of the optimal harvest period. The methodology was calibrated using real agricultural production datasets from 2020–2025, enabling statistical validation of relationships between spectral indices and productivity indicators. Results indicate strong potential for improving energy efficiency, reducing operational costs and enhancing sustainability in the sugar-energy sector.

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

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) representa uma das culturas agrícolas de maior relevância econômica e energética do Brasil, sendo base 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 uma 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, parâmetros

diretamente dependentes da determinação correta do ponto de maturação da cana, momento em 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 antecipar informações cruciais sobre seu 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 reduz 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; PIGNÈDE et al., 2021).

Sob essa perspectiva, o sensoriamento remoto surge como ferramenta essencial para a transição rumo 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).

Portanto, a utilização de imagens de satélite para a determinação da maturação da cana-de-açúcar constitui uma abordagem inovadora e estratégica, capaz de integrar tecnologia, sustentabilidade e eficiência energética. Este trabalho busca analisar o potencial dessas ferramentas para identificar o ponto ótimo de maturação, correlacionando informações espectrais com dados agronômicos e energéticos, e discutindo seus impactos positivos sobre o manejo agrícola e a conservação dos recursos naturais.

Diante dessas limitações, este trabalho apresenta um sistema automatizado desenvolvido para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar baseado em imagens orbitais multiespectrais, permitindo ao produtor acompanhar remotamente o desenvolvimento da cultura, estimar parâmetros produtivos e prever o momento ideal para colheita.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo



Figura 1. Vista espacial da Fazenda Santa Laura. Fonte: Google Earth Engine (2024).

A área de estudo compreende cultivo de cana-de-açúcar localizados no município de Vicentinópolis no Centro-Oeste do Brasil, caracterizado por clima tropical semiúmido com estações bem definidas: um verão quente e chuvoso e um inverno seco e mais ameno precipitação média anual entre 1400 a 1500 mm. Essa região apresenta predominância de Latossolos Vermelhos que garante profundidade favorável ao cultivo de cana-de-açúcar com manejo adequado devido sua deficiência de alguns nutrientes químicos. A escolha da área se justifica pela representatividade da região Sudoeste e Sul de Goiás, onde o município de encontra, que é um dos polos sucroalcooleiros do Brasil e pela disponibilidade de dados de campo- laboratoriais referentes ao teor de açúcares totais

recuperáveis (ATR), utilizados na correlação com os índices espectrais obtidos por satélite.

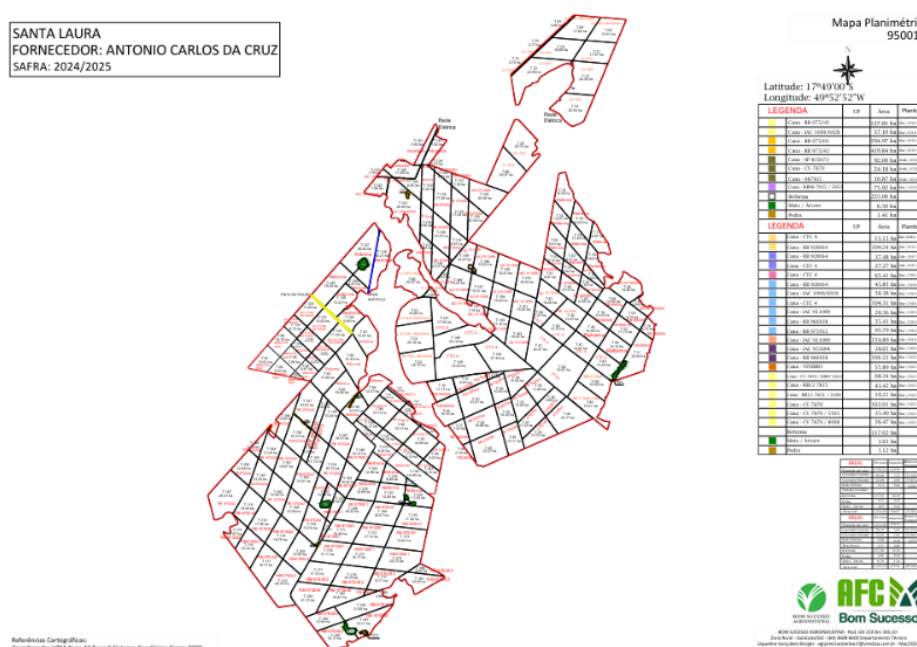


Figura 2. Mapa planimétrico da Fazenda Santa Laura safra 2024/2025. Fonte: Fazenda Santa Laura (2025).

Foram selecionados três talhões para o desenvolvimento deste estudo: os talhões 60 e 61, cultivados com a variedade CTC4, reconhecida por seu elevado potencial produtivo e ampla adaptação às condições de cultivo da região, e o talhão 62, cultivado com a variedade RB127825, desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético da Universidade Federal de Viçosa (UFV) em parceria com a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA), destacando-se pela elevada produção de biomassa e bom desempenho agrônomo.

A utilização de diferentes materiais genéticos permitiu avaliar possíveis variações nos padrões espectrais e fenológicos observados por sensoriamento remoto, contribuindo para uma análise mais abrangente da dinâmica de maturação da cultura. Essa abordagem amplia a robustez da avaliação multitemporal, possibilitando a validação dos índices espectrais em genótipos distintos e

fortalecendo a confiabilidade dos modelos propostos para estimativa do ponto ideal de colheita da cana-de-açúcar

2.2. Arquitetura do Sistema

O sistema desenvolvido neste estudo foi estruturado como uma aplicação computacional de apoio à decisão agrícola, com o objetivo de integrar dados orbitais, índices espectrais de vegetação e informações agronômicas para auxiliar na determinação do ponto de maturação da cana-de-açúcar. A arquitetura foi organizada em camadas funcionais, permitindo a separação entre a interface de usuário, o processamento das informações, a comunicação com bases de dados orbitais e a apresentação dos resultados finais.

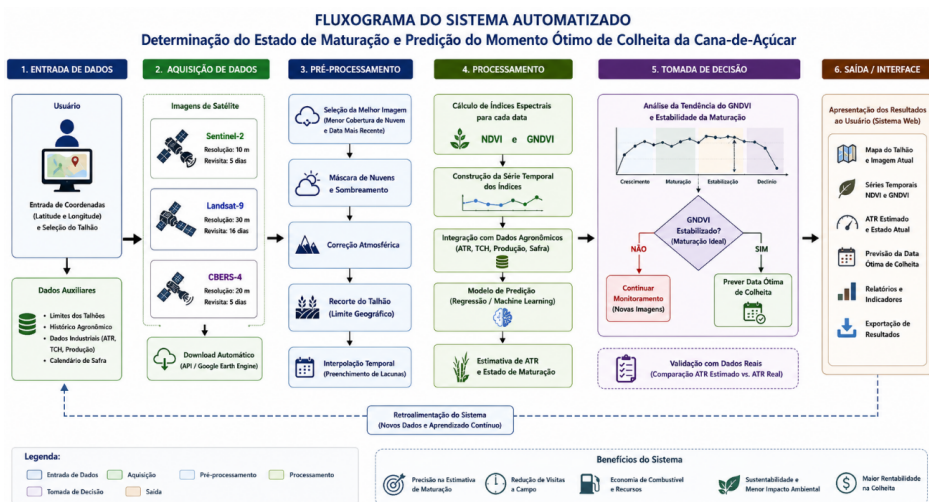


Figura 3. Arquitetura funcional do sistema proposto para monitoramento da maturação da cana-de-açúcar. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A primeira camada corresponde à interface web, responsável pela interação direta com o usuário. Nessa etapa, o produtor, técnico agrícola ou pesquisador informa os dados necessários para a análise, como coordenadas geográficas da área de interesse, 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 da safra.

A segunda camada é composta pelo backend da aplicação, desenvolvido para receber as solicitações da interface, organizar os parâmetros informados e executar as rotinas de processamento. Essa camada atua como intermediária entre o usuário e os serviços de sensoriamento remoto, realizando a seleção das imagens, o tratamento dos dados e o cálculo dos indicadores utilizados na avaliação da cultura.

A terceira camada corresponde à integração com bases orbitais, especialmente por meio do Google Earth Engine, que permite o acesso a coleções de imagens de diferentes satélites. O sistema foi concebido para utilizar imagens provenientes de sensores como Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4, priorizando automaticamente aquelas com menor cobertura de nuvens, melhor disponibilidade temporal e resolução espacial adequada para a análise agrícola. Essa alternância entre sensores tem como finalidade reduzir falhas nas séries temporais e ampliar a continuidade do monitoramento da cana-de-açúcar.

Após a seleção das imagens, o sistema realiza o pré-processamento e o cálculo dos índices espectrais NDVI e GNDVI. Esses índices são utilizados como indicadores do vigor vegetativo, da atividade fotossintética e das alterações fisiológicas associadas ao processo de maturação da cultura. A partir desses valores, são aplicadas regras de classificação para identificar o estágio predominante da lavoura, distinguindo condições vegetativas, fase de transição e estágio de maturação.

Além da classificação do estado da cultura, a arquitetura do sistema contempla um módulo de análise temporal. Esse módulo utiliza séries históricas dos índices espectrais para identificar tendências de crescimento, estabilização e redução do vigor vegetativo, comportamento esperado durante o avanço da maturação da cana-de-açúcar. Com base nessa tendência, o sistema estima uma possível janela de colheita, permitindo ao usuário antecipar decisões relacionadas ao planejamento agrícola e industrial.

Outro componente da arquitetura é o módulo de estimativa de ATR, que relaciona os índices espectrais obtidos por satélite com dados agronômicos e industriais. Esse módulo foi incluído para aproximar a análise remota da realidade econômica da produção, permitindo estimar o potencial de rendimento da matéria-prima e apoiar decisões relacionadas ao momento mais adequado para a colheita.

Por fim, os resultados são retornados ao usuário em forma de mapas, gráficos e indicadores numéricos. A interface apresenta informações como data da imagem utilizada, satélite selecionado, valores médios de NDVI e GNDVI, classificação da maturação, estimativa de ATR e previsão da possível data de colheita. Dessa forma, a arquitetura proposta integra diferentes fontes de dados e etapas de processamento em um fluxo automatizado, contribuindo para tornar o sensoriamento remoto uma ferramenta prática de apoio à tomada de decisão no setor sucroenergético.

2.3. Base de Dados Orbital e Alternância de Sensores

A análise multitemporal da maturação da cana-de-açúcar foi conduzida a partir da integração e alternância de diferentes satélites de observação da Terra, de modo a assegurar cobertura contínua e

reduzir lacunas temporais causadas por nuvens. Foram utilizadas imagens provenientes dos sensores:

- MSI/Sentinel-2A e 2B (European Space Agency), com resolução espacial de 10 m e revisitamento a cada 5 dias;
- OLI/Landsat 8 e 9 (NASA/USGS), com resolução espacial de 30 m e ciclo de visita de 16 dias;
- WFI/CBERS-4 e WPM/CBERS-4A (INPE/CRESDA), com resoluções de 64 m e 8 m, respectivamente, e visita média de 5 a 10 dias.

As imagens utilizadas neste estudo foram acessadas por meio do ambiente Google Earth Engine considerando as diferenças de resolução espacial, frequência de visita e condições atmosféricas presentes em cada aquisição, tornou-se necessário aplicar procedimentos de pré-processamento para garantir a comparabilidade dos dados ao longo das séries temporais.

Inicialmente, foi realizada a seleção automática das imagens com base em critérios de qualidade, priorizando cenas com menor percentual de cobertura de nuvens e maior proximidade temporal em relação à data de interesse. Essa estratégia permitiu reduzir lacunas temporais e aumentar a frequência de observação da cultura durante o ciclo produtivo.

Após a seleção das imagens, aplicou-se o mascaramento de nuvens e sombras utilizando as bandas de qualidade disponibilizadas pelos respectivos sensores. Esse procedimento teve como objetivo eliminar pixels contaminados por interferências atmosféricas que poderiam comprometer a estimativa dos índices espectrais. A

remoção dessas áreas é particularmente importante em regiões tropicais, onde a elevada frequência de nebulosidade pode introduzir ruídos significativos nas análises temporais.

Na sequência, as imagens foram recortadas utilizando os limites geográficos dos talhões analisados, restringindo o processamento apenas às áreas efetivamente ocupadas pela cultura da cana-de-açúcar. Essa etapa reduziu a influência de elementos externos, como estradas, corpos d'água, áreas urbanizadas e vegetação adjacente, aumentando a representatividade dos dados obtidos para cada unidade produtiva.

Devido à utilização de diferentes plataformas orbitais, também foi realizado um processo de padronização espacial dos dados. Essa padronização permitiu integrar informações provenientes de sensores com distintas resoluções espaciais, minimizando diferenças decorrentes das características técnicas de cada satélite e favorecendo a construção de séries temporais contínuas.

Após as etapas de filtragem e padronização, foram calculadas estatísticas descritivas para cada talhão, incluindo valores médios, mínimos, máximos e desvio-padrão das bandas espectrais utilizadas na geração dos índices de vegetação. Esses parâmetros serviram como base para o cálculo do NDVI e do GNDVI e para a posterior análise temporal do comportamento fisiológico da cultura.

Por fim, as imagens aprovadas no processo de pré-processamento foram armazenadas em banco de dados geoespacial e disponibilizadas para os módulos subsequentes do sistema, responsáveis pelo cálculo dos índices espectrais, classificação do

estágio de maturação, estimativa de ATR e previsão da janela ótima de colheita.

A sequência metodológica adotada permitiu reduzir inconsistências causadas por condições atmosféricas, diferenças entre sensores e interferências externas, contribuindo para aumentar a confiabilidade das análises realizadas ao longo do estudo.

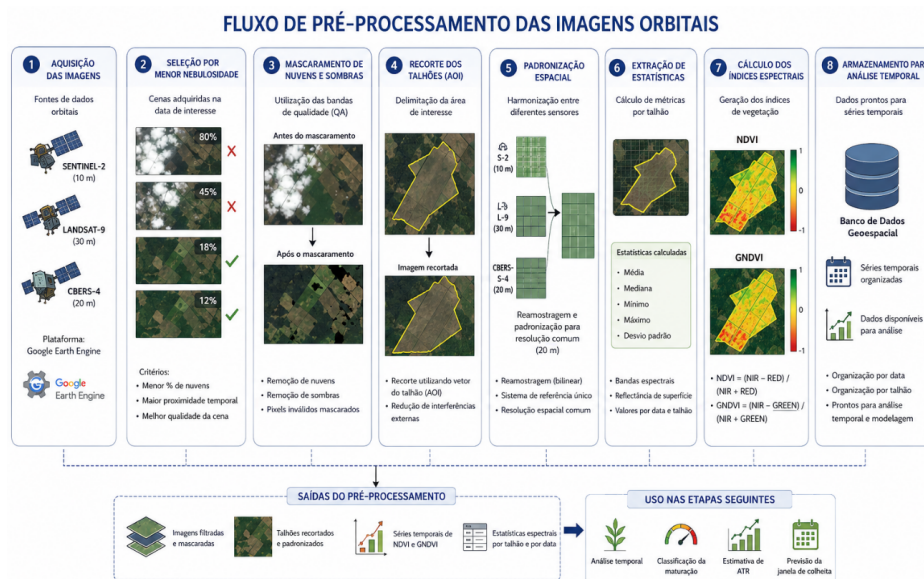


Figura 4. Fluxo de pré-processamento das imagens orbitais utilizadas no sistema. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.4. Índices Espectrais e Análise Temporal

A utilização de índices espectrais de vegetação constitui uma das principais aplicações do sensoriamento remoto no monitoramento agrícola. Esses índices são obtidos a partir da combinação matemática das bandas espectrais registradas pelos sensores orbitais, permitindo inferir características fisiológicas das plantas, como vigor vegetativo, atividade fotossintética, teor de clorofila e resposta ao estresse ambiental.

Neste estudo foram utilizados os índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), amplamente empregados na avaliação do

desenvolvimento vegetativo de culturas agrícolas e reconhecidos por sua capacidade de representar alterações fisiológicas relacionadas ao processo de maturação da cana-de-açúcar.

O NDVI foi calculado a partir das bandas do vermelho (RED) e infravermelho próximo (NIR), sendo definido pela Equação:

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

Os valores do NDVI variam entre -1 e +1, sendo que valores elevados indicam maior vigor vegetativo e elevada atividade fotossintética. À medida que a cultura avança para estágios mais próximos da maturação, ocorre redução gradual do crescimento vegetativo, refletindo-se em alterações nos valores observados.

Além do NDVI, foi utilizado o índice GNDVI, calculado a partir das bandas do verde (GREEN) e do infravermelho próximo (NIR), conforme apresentado na Equação:

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

O GNDVI apresenta maior sensibilidade às variações de clorofila foliar quando comparado ao NDVI, permitindo identificar mudanças fisiológicas associadas ao acúmulo de sacarose e ao processo de maturação da cana-de-açúcar. Por essa razão, este índice foi adotado como principal indicador para classificação do estágio de maturação da cultura.

Após o cálculo dos índices espectrais para cada imagem selecionada, os valores médios foram extraídos para os talhões estudados e organizados cronologicamente, formando séries temporais de monitoramento. Essas séries permitiram acompanhar

a evolução espectral da cultura ao longo do ciclo produtivo, reduzindo a influência de observações isoladas e fornecendo uma visão mais consistente do comportamento fisiológico das plantas.

A análise temporal baseou-se na observação da dinâmica dos índices NDVI e GNDVI ao longo do tempo. Durante a fase vegetativa, os índices tendem a apresentar crescimento progressivo em função do aumento da biomassa e da atividade fotossintética. Em estágios intermediários, observa-se estabilização dos valores, enquanto na fase de maturação ocorre redução gradual do vigor vegetativo e alterações fisiológicas relacionadas ao acúmulo de sacarose nos colmos.

Com base nessas tendências temporais, foi desenvolvido um modelo de interpretação espectral capaz de classificar automaticamente o estágio predominante da cultura em três categorias: vegetativo, transição e maturação. A classificação permitiu acompanhar a evolução da lavoura e identificar períodos favoráveis para a colheita.

Além da classificação do estágio de desenvolvimento, as séries temporais foram utilizadas para estimar a tendência futura dos índices espectrais. A partir dessa análise, tornou-se possível prever a aproximação do ponto ótimo de maturação, fornecendo suporte à tomada de decisão quanto ao planejamento da colheita e à estimativa da produtividade potencial da área monitorada.

A integração entre índices espectrais e análise temporal permitiu transformar observações pontuais em informações dinâmicas sobre o comportamento da cultura, contribuindo para aumentar a precisão das estimativas de maturação e reduzir a dependência de amostragens exclusivamente realizadas em campo.

2.4.1. Modelo Matemático de Predição de Colheita

A previsão do momento ideal de colheita constitui uma das principais funcionalidades do sistema desenvolvido, permitindo transformar informações espectrais obtidas por satélite em indicadores operacionais para o planejamento agrícola. Para isso, foi implementado um modelo matemático baseado na análise temporal dos índices espectrais, especialmente o GNDVI, considerado mais sensível às alterações fisiológicas relacionadas ao processo de maturação da cana-de-açúcar.

O princípio adotado considera que o desenvolvimento da cultura apresenta comportamento temporal contínuo. Durante o crescimento vegetativo ocorre aumento progressivo dos índices espectrais em decorrência da expansão foliar e do incremento da atividade fotossintética. À medida que a cultura se aproxima da maturação, observa-se redução gradual da taxa de crescimento vegetativo, acompanhada pelo acúmulo de sacarose nos colmos e pela estabilização ou diminuição dos índices de vegetação.

Para cada talhão monitorado, os valores médios de GNDVI foram organizados em séries temporais compostas por observações sucessivas ao longo da safra. A partir dessas séries foi ajustada uma curva de tendência capaz de representar o comportamento espectral da cultura durante seu ciclo produtivo que pode ser calculada pela fórmula:

$$GNDVI(t) = a + bt + ct^2$$

- t = tempo (dias)

- a , b, c = coeficientes estimados por regressão polinomial de segunda ordem (“a” início da curva, “b” taxa de crescimento e “c” curvatura da série temporal

A modelagem temporal permitiu identificar três fases distintas do desenvolvimento da cana-de-açúcar:

- Fase de crescimento vegetativo, caracterizada pelo aumento contínuo dos índices espectrais (GNDVI < 0,45);
- Fase de transição, marcada pela estabilização dos valores observados (GNDVI entre 0,45 a 0,55);
- Fase de maturação, caracterizada pela redução gradual do vigor vegetativo e aproximação do máximo potencial de acúmulo de sacarose (GNDVI > 0,55).

O sistema considera que a janela ótima de colheita ocorre quando a curva temporal atinge sua região de estabilização ou inicia sua tendência descendente. Esse comportamento indica que o crescimento vegetativo está sendo substituído pelo processo de maturação fisiológica da cultura.

A estimativa da data provável de colheita é calculada a partir da extrapolação da tendência observada nas séries temporais, permitindo prever o momento em que o índice espectral atingirá o limiar definido para maturação. Nesse ponto a taxa de crescimento se torna nula correspondendo ao início da estabilização do índice espectral indicando a aproximação da maturação fisiológica que pode ser calculada através da fórmula:

$$\frac{d(GNDVI)}{dt} = 0$$

Além da previsão temporal, o modelo permite atualizar continuamente as estimativas à medida que novas imagens são incorporadas ao banco de dados, aumentando gradativamente a precisão das previsões durante o ciclo produtivo.

A utilização de séries temporais orbitais reduz a dependência exclusiva de amostragens de campo, possibilitando monitoramento contínuo de grandes áreas agrícolas e fornecendo informações atualizadas para a tomada de decisão no setor sucroenergético inclusive estimativas de ATR que podem obtidas através da fórmula:

$$ATR_{\text{estimado}} = \alpha + \beta \cdot \text{GNDVI}$$

- α = intercepto da regressão;
- β = coeficiente angular da regressão;

Os parâmetros β representam os coeficientes de regressão obtidos durante o ajuste do modelo matemático, indicando a contribuição de cada índice espectral na estimativa do ATR. Valores absolutos mais elevados de β indicam maior influência da variável correspondente sobre a resposta observada obtidos a partir dos dados reais obtidos em laboratório e de valores de GNDVI/NDVI obtidos do sensoriamento dos talhões.

2.5. Integração com Dados de Campo

A validação dos resultados obtidos por sensoriamento remoto foi realizada por meio da integração de dados espectrais com informações agronômicas provenientes da Fazenda Santa Laura. A propriedade integra uma importante região produtora de cana-de-açúcar do Centro-Oeste brasileiro, caracterizada por elevada

mecanização agrícola e expressiva participação na cadeia sucroenergética regional.

Foram utilizados dados históricos referentes às safras compreendidas entre os anos de 2020 e 2025. O conjunto de dados contemplou aproximadamente 258 talhões agrícolas monitorados ao longo do período de estudo, totalizando mais de 38 mil hectares cadastrados para análise.

As informações de campo utilizadas incluíram área cultivada, variedade, número de cortes, produtividade agrícola (TCH), produção por talhão, época de colheita e valores de ATR. Essas informações constituíram a base para validação dos resultados produzidos pelo sistema desenvolvido.

Inicialmente, os talhões foram associados às respectivas áreas de interesse utilizadas no processamento das imagens orbitais. Essa associação permitiu relacionar os índices espectrais calculados para cada área agrícola com os dados efetivamente observados durante a colheita.

Após a integração espacial dos dados, foram comparados os valores médios dos índices espectrais NDVI e GNDVI com os indicadores agronômicos obtidos em campo. O objetivo foi identificar relações entre o comportamento espectral da cultura e os parâmetros tecnológicos utilizados pela indústria sucroenergética para avaliação da matéria-prima.

Entre os parâmetros analisados, o ATR foi utilizado como principal variável de validação devido à sua importância econômica na determinação da qualidade da cana-de-açúcar. Os registros observados apresentaram valores variando entre 90,65 e 161,81 kg/t ,

com média aproximada de 122,23 kg/t. A produtividade agrícola apresentou média de 80,72 t/ha ao longo das áreas avaliadas.

Os dados coletados permitiram o desenvolvimento de modelos de regressão destinados à estimativa do ATR a partir dos índices espectrais obtidos por sensoriamento remoto. Nessa abordagem, os índices NDVI e GNDVI foram utilizados como variáveis independentes, enquanto os valores de ATR observados em campo foram utilizados como variável dependente para calibração dos modelos.

A integração entre dados orbitais e dados de campo também possibilitou a calibração dos limiares utilizados para classificação dos estágios de maturação da cultura. Dessa forma, os padrões espectrais identificados nas imagens puderam ser associados às condições efetivamente observadas durante a colheita, aumentando a confiabilidade das estimativas produzidas pelo sistema.

Além da validação dos índices espectrais, os dados de campo forneceram suporte para avaliação da capacidade do sistema em estimar a produtividade potencial dos talhões e prever a janela ótima de colheita. A comparação entre valores observados e valores estimados permitiu quantificar o desempenho dos modelos e identificar oportunidades de aprimoramento da metodologia proposta.

A utilização de dados reais provenientes da Fazenda Santa Laura representou uma etapa fundamental para o desenvolvimento do sistema, permitindo que as análises realizadas deixassem de ser exclusivamente teóricas e passassem a refletir as condições

efetivamente encontradas na produção comercial de cana-de-açúcar.

2.6. Análise Sustentável e Impactos Ambientais

A sustentabilidade tem assumido papel estratégico na produção de cana-de-açúcar, especialmente diante da crescente necessidade de aumentar a eficiência produtiva e reduzir os impactos ambientais associados às operações agrícolas. Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital surge como uma ferramenta capaz de contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, permitindo o monitoramento contínuo das lavouras sem a necessidade de intervenções frequentes em campo.

O sistema desenvolvido neste estudo foi concebido para fornecer informações sobre o estágio de maturação da cana-de-açúcar utilizando imagens de satélite e análise temporal de índices espectrais. Essa abordagem possibilita a redução da dependência de amostragens presenciais e deslocamentos constantes de equipes técnicas, diminuindo o consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões associadas às atividades de monitoramento agrícola.

A utilização de dados orbitais também permite maior racionalização das operações de colheita. Ao identificar previamente a janela ótima para o corte da cana-de-açúcar, o sistema contribui para um planejamento logístico mais eficiente, reduzindo deslocamentos desnecessários de máquinas e equipamentos agrícolas. Essa otimização operacional reflete diretamente na diminuição do consumo energético das operações mecanizadas e na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Outro benefício observado está relacionado à preservação das características físicas do solo. A realização de operações agrícolas em períodos inadequados pode favorecer processos de compactação, reduzindo a infiltração de água e comprometendo o desenvolvimento radicular da cultura. A previsão da melhor época para colheita permite minimizar operações repetitivas e contribuir para a conservação da estrutura do solo ao longo dos ciclos produtivos.

Do ponto de vista econômico e ambiental, a maximização do ATR representa um importante indicador de sustentabilidade. A colheita realizada em estágios adequados de maturação aumenta a eficiência do aproveitamento industrial da matéria-prima, permitindo maior produção de açúcar e etanol por unidade de área cultivada. Dessa forma, torna-se possível aumentar a produtividade sem a necessidade de expansão das áreas agrícolas, contribuindo para a preservação dos recursos naturais.

A análise dos dados obtidos na Fazenda Santa Laura demonstrou que os valores de ATR apresentaram elevada variabilidade entre talhões e safras, evidenciando a importância de ferramentas que permitam identificar o momento mais adequado para a colheita. A utilização de imagens multissatélites associadas aos índices NDVI e GNDVI mostrou potencial para auxiliar nessa tomada de decisão, promovendo melhor aproveitamento dos recursos produtivos disponíveis.

Além dos benefícios operacionais, a utilização de tecnologias digitais aplicadas à agricultura contribui para o fortalecimento dos princípios da Agricultura 4.0, caracterizada pelo uso intensivo de dados, automação e inteligência computacional. O sistema possibilita a

geração contínua de informações geoespaciais que podem ser incorporadas aos processos de gestão agrícola, ampliando a capacidade de planejamento e reduzindo desperdícios.

Sob a perspectiva ambiental, a metodologia proposta apresenta potencial para contribuir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à produção responsável, inovação tecnológica, eficiência energética e ação climática. A integração entre sensoriamento remoto e análise temporal constitui uma alternativa viável para promover maior sustentabilidade na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, conciliando ganhos econômicos com redução dos impactos ambientais.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a utilização de sistemas automatizados baseados em imagens orbitais pode representar uma importante ferramenta de apoio à sustentabilidade agrícola, contribuindo para a modernização do setor sucroenergético e para a adoção de práticas produtivas ambientalmente mais eficientes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Sistema Desenvolvido

O principal produto desta pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema automatizado para monitoramento da maturação da cana-de-açúcar baseado em sensoriamento remoto orbital. A plataforma foi projetada para integrar imagens multiespectrais provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4, processando automaticamente os dados e disponibilizando ao usuário

informações relacionadas ao estado de maturação da cultura, estimativa de ATR e previsão da janela ideal de colheita.

O sistema foi desenvolvido com arquitetura web, permitindo acesso por computadores, tablets e dispositivos móveis conectados à internet. A interface foi concebida para utilização por técnicos agrícolas, gestores e produtores rurais, dispensando conhecimentos avançados em geoprocessamento ou sensoriamento remoto.

O fluxo operacional inicia-se com a inserção das coordenadas geográficas da área de interesse. Em seguida, o sistema realiza automaticamente a consulta das imagens disponíveis, selecionando o sensor mais adequado de acordo com critérios de resolução espacial, data de aquisição e cobertura de nuvens. Após o processamento das imagens, são calculados os índices espectrais NDVI e GNDVI, utilizados para classificação do estágio fisiológico da cultura.



Figura 5. Tela principal do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados são apresentados em ambiente gráfico intuitivo contendo imagens orbitais processadas, séries temporais dos índices espectrais, classificação da maturação, estimativa de ATR e previsão

do período ideal para realização da colheita. Dessa forma, o sistema transforma dados complexos de sensoriamento remoto em informações práticas para apoio à tomada de decisão no setor sucroenergético.

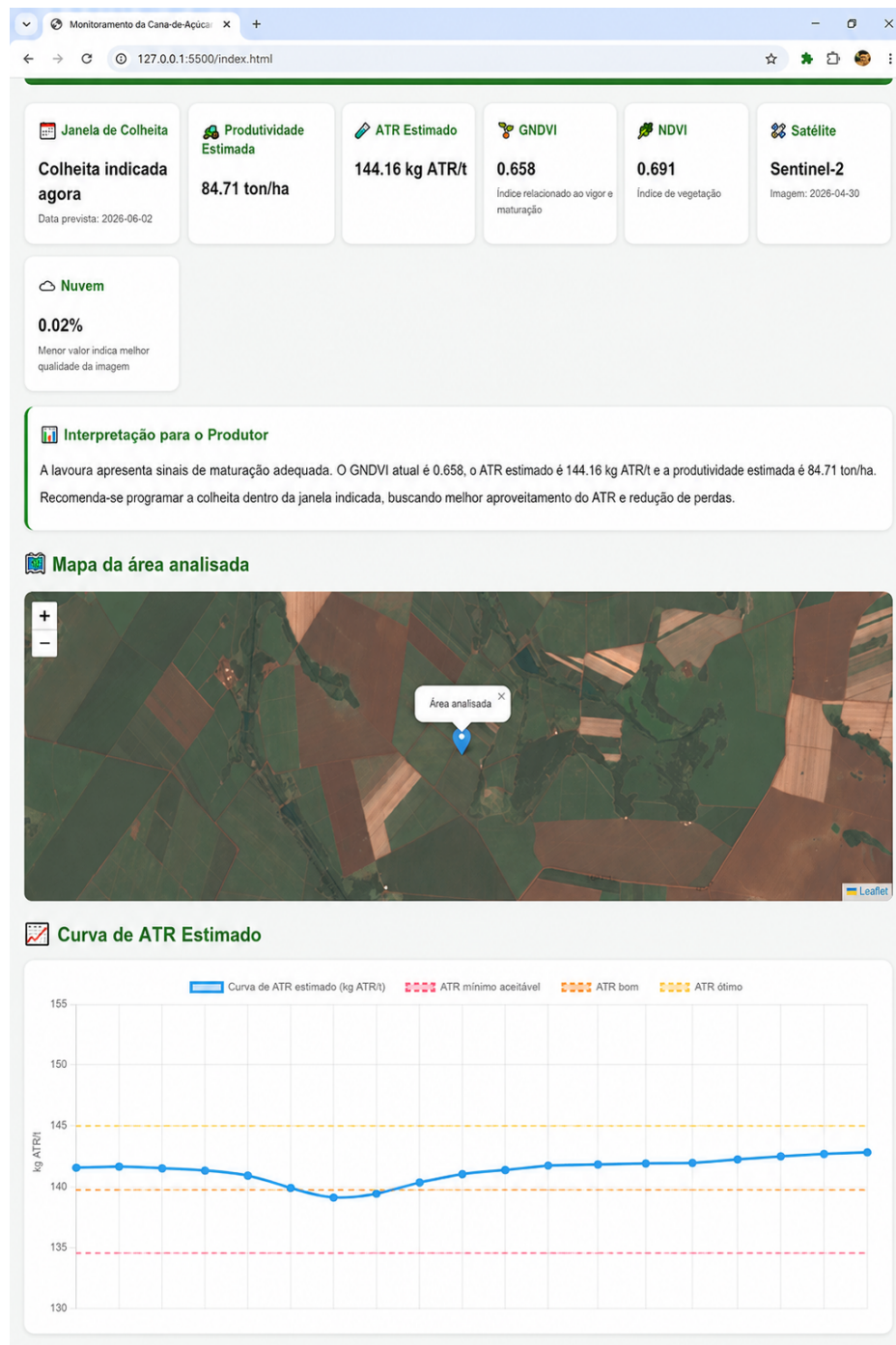


Figura 6. Painel de resultados do sistema de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2. Caracterização da Base de Dados

A base de dados utilizada neste estudo foi composta por informações agronômicas provenientes da Fazenda Santa Laura e os dados de satélite referentes aos talhões 60, 61 e 62 escolhidos pela proximidade entre eles e pela variedade da planta CTC4(60 e 61) e RB12 7825 (62).

Foram analisados registros referentes às safras compreendidas entre os anos de 2020 e 2025, totalizando aproximadamente 258 talhões. As informações incluíram área cultivada, produtividade agrícola (TCH), produção total, ATR observado e demais parâmetros operacionais utilizados pela unidade industrial. A área total ultrapassou 38 mil hectares durante o período avaliado, representando uma amostra significativa das condições produtivas da região.

SAFRA	ÁREA(ha)	TALHÕES	TON.	ATR
2020	6344	203	307.011,42	151,53
2021	6817	224	242.047,00	154,94
2022	7052	225	235.014,28	151,43
2023	6101	204	209.136,64	150,63
2024	6062	202	230.418,90	143,01
2025	6098	209	235.246,14	139,64

Tabela 1. Indicadores produtivos da cultura da cana-de-açúcar na Fazenda Santa Laura entre as safras de 2020 a 2025. Fonte Fazenda Santa Laura (2025).

Os valores de ATR observados nos talhões apresentaram variação entre 90,65 e 161,81 kg/t, com média aproximada de 122,23 kg/t. A

produtividade agrícola média observada foi de 80,72 t/ha, evidenciando a elevada capacidade produtiva das áreas analisadas.

Observa-se uma redução significativa de produtividade entre 2020 e 2023 que coincide com envelhecimento de vários talhões, aumento do número de cortes, influência climática acumulada e redução do vigor vegetativo, ocorrendo uma recuperação em 2025.

A amplitude observada nos valores de ATR e produtividade demonstra a existência de variabilidade espacial e temporal entre talhões, reforçando a importância de ferramentas capazes de monitorar continuamente o desenvolvimento da cultura e auxiliar na determinação do momento ideal de colheita.

3.3. Comportamento Espectral e Identificação do Ponto de Maturação

A análise das séries temporais permitiu identificar padrões consistentes de comportamento espectral ao longo do ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Os índices espectrais apresentaram crescimento progressivo durante o desenvolvimento vegetativo da cultura, seguido por estabilização e posterior redução à medida que os talhões se aproximavam da maturação.

O índice GNDVI demonstrou maior sensibilidade às alterações fisiológicas associadas ao processo de maturação quando comparado ao NDVI, corroborando resultados reportados na literatura. Durante a fase vegetativa foram observados valores elevados associados ao intenso desenvolvimento foliar e à elevada atividade fotossintética.

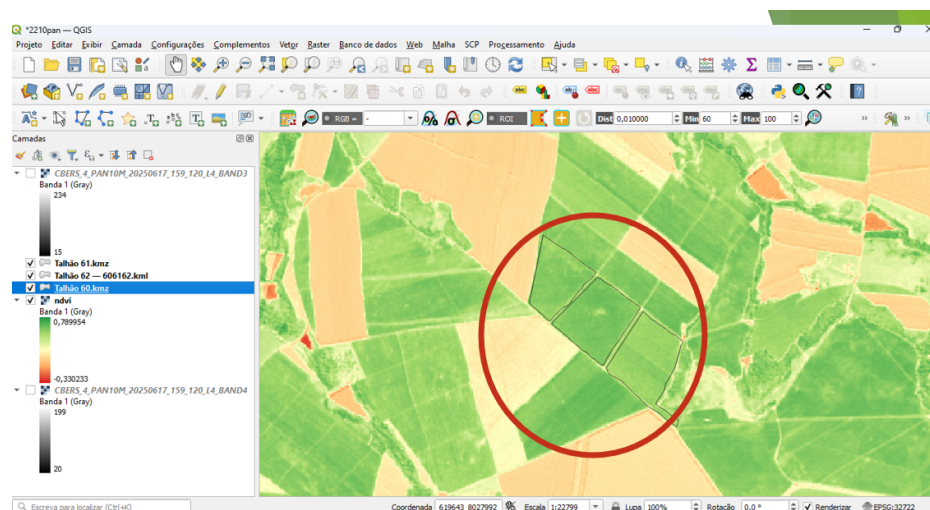


Figura 7. Visualização do índice NDVI dos talhões analisados no software QGIS. Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

À medida que a cultura avançou para estágios mais próximos da colheita, observou-se redução gradual dos valores médios de GNDVI, comportamento compatível com o acúmulo de sacarose nos colmos e diminuição da expansão vegetativa. Esse padrão permitiu estabelecer critérios para identificação automática das fases vegetativa, transição e maturação.

3.4. Desempenho da Alternância de Satélites na Continuidade das Séries Temporais

A utilização integrada dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4 contribuiu para aumentar a frequência de observações disponíveis ao longo do ciclo produtivo. A alternância automática entre sensores reduziu lacunas temporais provocadas por cobertura de nuvens e limitações operacionais específicas de cada plataforma orbital.

SATÉLITE	RESOLUÇÃO	REVISITA
SENTINEL 2	10 m	5 dias
LANDSAT 9	30 m	16 dias
CBERS 4	20 m	5 dias

Tabela 2. Características dos satélites utilizados no estudo. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

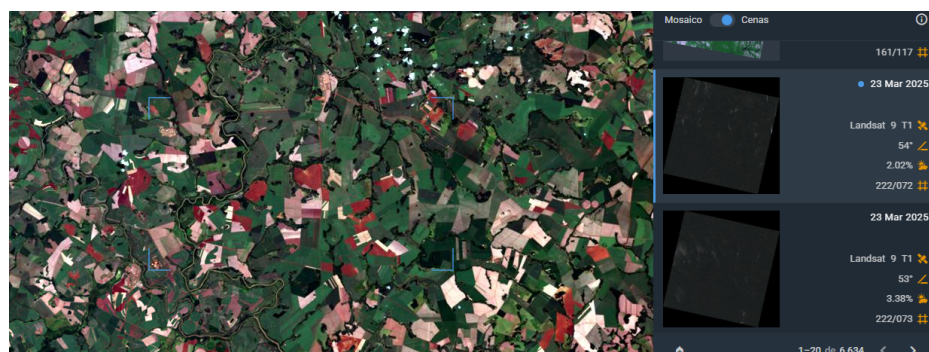


Figura 8. Imagem do satélite Landsat 9 utilizada no monitoramento da área de estudo em 23 de março de 2025.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Landsat 9 (2025).



Figura 9. Imagem do satélite CBERS-4 utilizada no monitoramento da área de estudo em 25 de março de 2025.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do CBERS-4 (2025).

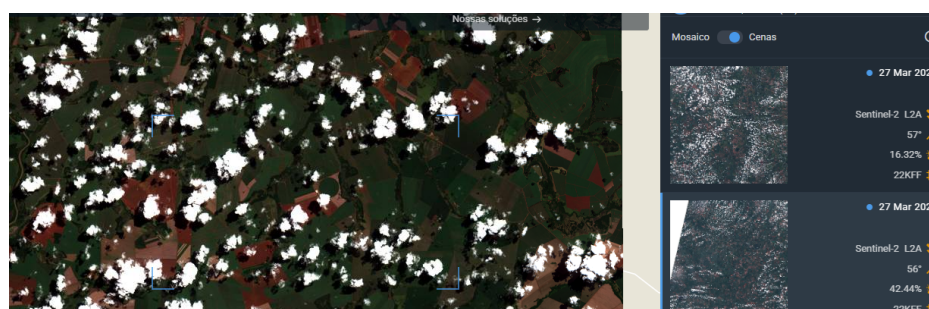


Figura 10. Imagem do satélite Sentinel 2 utilizada no monitoramento da área de estudo em 27 de março de 2025.
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Sentinel 2 (2025).

A estratégia permitiu ampliar a disponibilidade de imagens válidas para análise, favorecendo a construção de séries temporais mais contínuas e representativas. Esse aspecto mostrou-se particularmente importante durante os meses de maior ocorrência

de nebulosidade, quando a utilização de um único satélite poderia comprometer a obtenção de dados consistentes.

3.5. Limitações e Ajustes no Modelo

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos na identificação do ponto de maturação da cana-de-açúcar e na estimativa do ATR por meio de índices espectrais, algumas limitações foram observadas durante o desenvolvimento e validação do sistema. Essas limitações estão relacionadas principalmente à disponibilidade de imagens orbitais, às características varietais da cultura e às simplificações adotadas no modelo de predição.

Uma das principais limitações identificadas foi a influência da cobertura de nuvens sobre as imagens de satélite. Embora o sistema utilize a alternância entre os satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4 para aumentar a disponibilidade temporal dos dados, períodos prolongados de nebulosidade podem reduzir a quantidade de imagens adequadas para análise, afetando a continuidade das séries temporais.

Outra limitação está associada às diferenças genéticas entre as variedades de cana-de-açúcar avaliadas. As variedades CTC4 e RB127825 apresentam comportamentos fisiológicos distintos ao longo do ciclo produtivo, influenciando a resposta espectral observada pelos sensores orbitais. Dessa forma, modelos calibrados para uma determinada variedade podem apresentar variações de desempenho quando aplicados a materiais genéticos diferentes.

Também deve ser considerado o efeito da resolução espacial dos sensores utilizados. O Sentinel-2 possui resolução espacial de 10 metros, enquanto o CBERS-4 e o Landsat-9 apresentam resoluções

de 20 e 30 metros, respectivamente. Essas diferenças podem introduzir pequenas variações nos valores médios dos índices espectrais, especialmente em talhões com áreas reduzidas ou com elevada heterogeneidade espacial.

Durante a etapa de validação observou-se que a estimativa de ATR apresentou níveis distintos de precisão entre os talhões analisados. Tal comportamento pode estar relacionado à variabilidade natural da cultura, às condições climáticas locais, ao manejo agrícola empregado e à ausência de variáveis complementares, como precipitação acumulada, temperatura do ar, umidade do solo e informações detalhadas sobre fertilidade.

Como forma de minimizar essas limitações, foram implementados mecanismos de seleção automática das melhores imagens disponíveis, filtragem de nuvens, integração de séries temporais multissensores e ajustes nos coeficientes de predição. Além disso, a utilização de dados reais de ATR fornecidos pela Fazenda Santa Laura permitiu recalibrar o modelo e aumentar sua aderência às condições locais de cultivo.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de variáveis meteorológicas, dados provenientes de sensores embarcados em drones e algoritmos avançados de aprendizado de máquina, como redes neurais artificiais e modelos de aprendizado profundo, visando aumentar a precisão das estimativas e ampliar a capacidade de generalização do sistema para diferentes regiões produtoras.

3.6. Validação dos Modelos de Predição

A validação dos modelos foi realizada por meio da comparação entre os valores estimados pelo sistema e os dados observados em campo.

Os resultados indicaram que os índices espectrais apresentam potencial para estimativa do estado de maturação e do ATR da cana-de-açúcar.

Em grande parte dos talhões analisados, os valores estimados apresentaram comportamento compatível com os registros observados pela análise tecnológica realizada pela unidade industrial receptora. Entretanto, foram identificados casos específicos em que ocorreram diferenças significativas entre os valores previstos e os valores efetivamente observados.

Um exemplo relevante foi identificado no Talhão 61 da safra de 2025, no qual o ATR observado foi de 149,25 kg/t¹ enquanto o valor estimado pelo sistema foi de 165,17 kg/t. Essa diferença corresponde a um erro aproximado de 10,67%.

TALHÃO	VARIETADE	ÁREA(ha)	ATR REAL	ATR ESTIMADO	ERRO ABSOLUTO
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

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/sistema-automatizado-para-determinacao-do-estado-de-maturacao-da-cana-de-acucar-e-predicao-do-momento-otimo-de-colheita-utilizando-sensoriamento-remoto-multiespectral?noblockage>

Tabela 3. Comparação entre ATR real e ATR estimado nos talhões avaliados. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com o objetivo de compreender a discrepância observada entre os valores de ATR estimados pelo sistema e aqueles determinados por análises laboratoriais, foi realizada uma investigação dos fatores agrônômicos, fisiológicos e ambientais que poderiam influenciar o desempenho do modelo preditivo. Essa investigação identificou a ocorrência de brotamento no Talhão 61, evidenciando que esse fenômeno exerceu influência direta sobre os resultados obtidos.

O brotamento caracteriza a retomada da atividade vegetativa da cana-de-açúcar após o período de maturação. Nesse processo, parte da sacarose acumulada nos colmos é mobilizada para o desenvolvimento de novas gemas e folhas, ocasionando redução da concentração de açúcares recuperáveis e, conseqüentemente, dos valores de ATR determinados em laboratório. Simultaneamente, o surgimento de tecidos foliares jovens promove aumento da atividade fotossintética e da concentração de clorofila, alterando a resposta espectral da cultura e elevando índices de vegetação, como o GNDVI. Dessa forma, enquanto a análise tecnológica registra redução do ATR em razão do consumo de sacarose, o modelo baseado em imagens orbitais responde ao aumento do vigor vegetativo, podendo superestimar o potencial produtivo da área.

A investigação realizada confirmou que esse comportamento ocorreu no Talhão 61. O sistema estimou um ATR de **165,17 kg t⁻¹**, enquanto a análise laboratorial registrou **149,25 kg t⁻¹**, resultando em uma diferença de **10,67%**. A inspeção da área evidenciou a presença de brotamento, explicando a divergência entre os resultados laboratoriais e as estimativas espectrais. Nesse caso, a redução do ATR observada em laboratório decorreu da mobilização de sacarose para o desenvolvimento dos novos brotos, ao passo que

a resposta espectral captada pelo satélite refletiu o aumento da atividade fotossintética da cultura.

Embora fatores como resolução espacial das imagens, heterogeneidade intratalhão, intervalo entre a aquisição das imagens e a coleta das amostras, condições climáticas e características varietais também possam influenciar o desempenho do modelo, a investigação realizada permitiu identificar o brotamento como o principal fator responsável pela diferença observada no Talhão 61.

Os resultados demonstram que a interpretação de índices espectrais deve considerar não apenas a resposta radiométrica da cultura, mas também seu estágio fenológico e suas condições fisiológicas. Dessa forma, a incorporação de mecanismos capazes de identificar automaticamente áreas em início de brotamento representa uma perspectiva importante para o aprimoramento do sistema, contribuindo para aumentar a precisão das estimativas de ATR e a confiabilidade da ferramenta de apoio à decisão.

3.7. Impactos na Eficiência Energética da Colheita

Os resultados obtidos indicam que a utilização de informações espectrais para previsão da maturação pode contribuir para aumentar a eficiência energética das operações agrícolas. A determinação antecipada da janela ótima de colheita permite melhor planejamento da utilização de colhedoras, veículos de transporte e equipes operacionais.

Um exemplo a ser observado é a medição de ATR de alguns talhões extraídos da base de dados agronômica oferecida pela fazenda no ano de 2025, onde mensuram a produtividade de cada talhão. Como

podemos observar há uma diferença de ATR que poderia ser diminuída se houvesse um planejamento de colheita que contemplasse melhores índices de ATR.

TALHÃO	ATR REAL	ÁREA (ha)	TCH	CORTE	COLHEITA
06	147,25	14,06	64,6	MÉDIA	JUNHO
11	70,63	20,92	64,6	PRECOCE	ABRIL
28	155,83	23,27	54	TARDIA	SETEMBRO
41	97,52	14,07	64,6	MÉDIA	JULHO
55	121,4	10,58	131,2	TARDIA	SETEMBRO

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/sistema-automatizado-para-determinacao-do-estado-de-maturacao-da-cana-de-acucar-e-predicao-do-momento-otimo-de-colheita-utilizando-sensoriamento-remoto-multiespectral?noblockage>

Tabela 4. Características agronômicas dos talhões avaliados na safra 2025. Fonte Elaborado pelo autor a partir dos dados da Fazenda Santa Laura (2025).

A redução de deslocamentos desnecessários, associada à otimização das rotas de colheita, contribui para diminuição do consumo de combustível e aumento da eficiência operacional. Adicionalmente, a colheita realizada em estágios adequados de maturação favorece o melhor aproveitamento industrial da matéria-prima, aumentando a produção de açúcar e etanol por unidade de energia investida.

3.8. Benefícios Ambientais e Mitigação da Contaminação e Compactação do Solo

A utilização de monitoramento remoto permite reduzir a dependência de amostragens frequentes em campo, contribuindo para diminuição das emissões associadas ao deslocamento de veículos e equipes técnicas.

Além disso, o planejamento mais eficiente das operações agrícolas pode reduzir o tráfego excessivo de máquinas sobre os talhões, minimizando processos de compactação do solo. A maximização do ATR também favorece o aumento da produtividade sem necessidade de expansão das áreas cultivadas, contribuindo para a utilização mais racional dos recursos naturais disponíveis.

Essas ações coordenadas demonstram que a integração entre sensoriamento remoto e agricultura de precisão pode contribuir simultaneamente para ganhos econômicos, energéticos e ambientais no setor sucroenergético.

3.9. Análise Financeira da Otimização da Colheita

Além dos benefícios operacionais e ambientais, a utilização de sistemas de monitoramento da maturação da cana-de-açúcar apresenta potencial para gerar ganhos econômicos significativos ao produtor rural. Para avaliar esse impacto, foi realizada uma análise financeira utilizando dados reais de ATR obtidos na Fazenda Santa Laura durante a safra de 2025.

A análise considerou o valor de referência de R\$ 114,09 por quilograma de ATR por tonelada de cana, comparando a receita efetivamente obtida em cada talhão com aquela que seria

alcançada caso todos os talhões apresentassem apenas o ATR padrão utilizado como referência comercial.

MÊS DE COLHEITA	TALHÃO	ATR REAL	TC POR TALHÃO	VALOR 114,09 KG DE ATR/TON	VALC TALHÃO
ABRIL	11	70,63	1351,43	167,0734	139.771
MAIO	84	82,36	646,99	172,1618	80.408
JUNHO	06	147,25	908,28	163,0917	191.187

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/sistema-automatizado-para-determinacao-do-estado-de-maturacao-da-cana-de-acucar-e-predicao-do-momento-otimo-de-colheita-utilizando-sensoriamento-remoto-multiespectral?noblockage>

Tabela 5. Resultado econômico dos talhões em função do ATR obtido na colheita.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Fazenda Santa Laura(2025).

Os resultados demonstram grande variabilidade econômica entre os talhões em função das diferenças observadas nos níveis de maturação da cultura. Os talhões colhidos precocemente apresentaram ATR reduzido e, conseqüentemente, menor retorno financeiro. O Talhão 11, colhido em abril, apresentou ATR de 70,63 kg ATR/t, gerando uma diferença negativa de R\$ 86.008,82 em relação ao valor potencial obtido com um ATR mais elevado. Situação

semelhante foi observada no Talhão 84, colhido em maio, que apresentou perda estimada de R\$ 30.978,24.

Por outro lado, os talhões colhidos em períodos mais avançados da safra apresentaram maior concentração de sacarose e melhor desempenho econômico. O Talhão 62, colhido em agosto, apresentou ATR de 161,33 kg ATR/t e gerou resultado financeiro positivo de R\$ 80.224,89 em comparação ao valor de referência. Resultados semelhantes foram observados nos Talhões 28 e 59, que apresentaram ganhos de R\$ 79.655,26 e R\$ 47.220,81, respectivamente.

Somando-se os resultados positivos e negativos observados nos nove talhões avaliados, verifica-se um saldo financeiro positivo aproximado de R\$ 179.835,44. Esse resultado evidencia que a correta definição da janela de colheita pode representar ganhos econômicos expressivos para o produtor, mesmo sem alterações no manejo agrícola ou aumento dos custos de produção.

Os resultados reforçam a importância da utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e análise temporal dos índices espectrais para apoio à tomada de decisão. A identificação antecipada do ponto ótimo de maturação permite direcionar o planejamento da colheita para períodos de maior concentração de ATR, maximizando o retorno econômico da lavoura e aumentando a eficiência do sistema produtivo.

Dessa forma, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental e para a eficiência energética do setor sucroenergético, o sistema proposto demonstrou potencial para agregar valor econômico ao processo produtivo, reduzindo perdas decorrentes de colheitas

antecipadas ou tardias e proporcionando maior rentabilidade ao produtor rural.

3.10. Síntese dos Resultados

Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstraram o potencial da utilização de imagens orbitais multiespectrais para monitoramento da maturação da cana-de-açúcar e apoio à tomada de decisão no planejamento da colheita. A integração entre sensoriamento remoto, análise temporal e dados de campo permitiu desenvolver uma metodologia capaz de identificar padrões espectrais associados ao desenvolvimento fisiológico da cultura.

A utilização dos índices NDVI e GNDVI possibilitou acompanhar a evolução temporal dos talhões ao longo das safras analisadas. Entre os índices avaliados, o GNDVI apresentou maior sensibilidade às alterações relacionadas ao processo de maturação, demonstrando maior potencial para utilização em modelos de predição do ponto ótimo de colheita.

A estratégia de alternância automática entre os satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4 mostrou-se eficiente para reduzir lacunas temporais provocadas por cobertura de nuvens e limitações operacionais individuais de cada sensor. Essa abordagem aumentou a disponibilidade de imagens válidas para análise e contribuiu para a construção de séries temporais mais contínuas e representativas.

A integração com os dados reais da propriedade agrícola permitiu validar os resultados obtidos pelo sistema e estabelecer relações entre os índices espectrais e os parâmetros agronômicos observados em campo. Os dados analisados contemplaram aproximadamente

258 talhões agrícolas monitorados entre as safras de 2020 e 2025, totalizando mais de 38 mil hectares avaliados.

Os valores observados de ATR apresentaram ampla variabilidade entre talhões e safras, variando entre 90,65 e 161,81 kg/t, com média aproximada de 122,23 kg/t. Essa variabilidade reforça a importância da utilização de ferramentas capazes de monitorar continuamente o comportamento da cultura e auxiliar na definição da melhor estratégia de colheita.

Os modelos de predição desenvolvidos apresentaram resultados promissores, embora tenham sido identificadas diferenças entre valores estimados e observados em alguns talhões específicos. Essas divergências evidenciam a necessidade de contínuo aperfeiçoamento dos modelos matemáticos, principalmente por meio da incorporação de novas variáveis agronômicas e ampliação da base histórica utilizada na calibração.

Sob a perspectiva operacional, o sistema demonstrou potencial para auxiliar no planejamento da colheita, permitindo identificar períodos mais favoráveis para o corte da cana-de-açúcar e contribuindo para melhor aproveitamento industrial da matéria-prima. Além dos benefícios produtivos, os resultados indicam potencial para redução do consumo de combustível, otimização do uso de máquinas agrícolas e diminuição da necessidade de deslocamentos frequentes para monitoramento em campo.

Os benefícios ambientais observados incluem redução das emissões associadas às operações de monitoramento, diminuição dos riscos de compactação do solo e aumento da eficiência no uso dos recursos produtivos. Dessa forma, a metodologia proposta apresenta

potencial para contribuir simultaneamente com a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética e a competitividade econômica do setor sucroenergético.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram que a integração entre sensoriamento remoto, análise temporal e dados de campo constitui uma alternativa viável para apoiar o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar, fornecendo informações relevantes para a gestão agrícola e para o planejamento estratégico da colheita.

Os resultados demonstram que a integração entre sensoriamento remoto, séries temporais e dados de campo permitiu identificar o estágio de maturação da cana-de-açúcar, estimar o ATR e apoiar a definição da melhor janela de colheita. A validação realizada na Fazenda Santa Laura evidenciou o potencial da metodologia como ferramenta de apoio à decisão técnica, econômica e ambiental.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou o desenvolvimento de um sistema automatizado para monitoramento da maturação da cana-de-açúcar utilizando imagens orbitais multiespectrais e análise temporal de índices de vegetação. A metodologia proposta integrou dados provenientes dos satélites Sentinel-2, Landsat-9 e CBERS-4, permitindo ampliar a disponibilidade de informações e reduzir limitações associadas à utilização de sensores individuais.

A utilização dos índices espectrais NDVI e GNDVI demonstrou potencial para representar o comportamento fisiológico da cultura ao longo do ciclo produtivo. Entre os índices avaliados, o GNDVI apresentou maior sensibilidade às alterações relacionadas ao

processo de maturação, constituindo-se como um importante indicador para o monitoramento da cultura e para a construção dos modelos de predição implementados no sistema.

A integração entre imagens orbitais e dados de campo provenientes da Fazenda Santa Laura, permitiu validar a aplicabilidade da metodologia em condições reais de produção. A utilização de informações históricas referentes às safras de 2020 a 2025 possibilitou o desenvolvimento de modelos capazes de relacionar o comportamento espectral da cultura com indicadores agronômicos utilizados na gestão da produção sucroenergética.

Os resultados demonstraram que a análise temporal dos índices espectrais pode ser empregada como ferramenta de apoio à identificação do estágio de maturação da cana-de-açúcar e à estimativa da janela mais adequada para colheita. A utilização de séries temporais permitiu acompanhar a evolução da cultura ao longo do tempo, fornecendo informações que dificilmente seriam obtidas por meio de avaliações pontuais realizadas exclusivamente em campo.

Além dos benefícios agronômicos, o sistema desenvolvido apresenta potencial para contribuir com a otimização das operações agrícolas, permitindo melhor planejamento da colheita e utilização mais eficiente dos recursos disponíveis. A disponibilização de informações de forma automatizada favorece a tomada de decisão baseada em dados, reduzindo incertezas operacionais e ampliando a capacidade de monitoramento de grandes áreas agrícolas.

Sob a perspectiva da sustentabilidade, a metodologia proposta contribui para a redução da necessidade de deslocamentos

frequentes para inspeções presenciais, promovendo menor consumo de combustíveis fósseis e redução das emissões associadas às atividades de monitoramento agrícola. Adicionalmente, a melhoria no planejamento das operações de colheita pode contribuir para redução da compactação do solo e melhor aproveitamento da matéria-prima processada pela indústria.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a integração entre sensoriamento remoto, análise temporal e dados de campo constitui uma alternativa tecnicamente viável para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar. O sistema desenvolvido apresenta potencial para aplicação prática em ambientes produtivos, contribuindo para o avanço da agricultura digital e para o fortalecimento da sustentabilidade e da eficiência energética na cadeia sucroenergética.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a ampliação da base histórica utilizada na calibração dos modelos, a incorporação de novas variáveis agronômicas e meteorológicas, bem como a integração de técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar a precisão das estimativas e ampliar a capacidade preditiva do sistema.

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://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-cana-de-acucar-e-estimada-em-652-9-milhoes-de-toneladas-influenciada-por-boia-produtividade>.

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.

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.

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.

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->

¹ Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde - GO, Brasil.

E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES, Campus Presidente Kennedy Presidente Kennedy – ES,

Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Instituto Federal de Goiano - Campus Morrinhos, Morrinhos – GO,

Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara, Itumbiara – GO,

Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara, Itumbiara – GO,

Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, Rio Verde – GO, Brasil.

E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)