

O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratização mundial do conhecimento.



# **BOLETIM DE CONJUNTURA**

**BOCA**

Ano VII | Volume 23 | Nº 67 | Boa Vista | 2025

<http://www.ioles.com.br/boca>

ISSN: 2675-1488

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15871939>

---



## UTILIZAÇÃO DE IMAGEAMENTO MULTIESPECTRAL POR SATÉLITE PARA MONITORAMENTO DE CICLO FENOLÓGICO DA CULTURA DA SOJA

*Ralph Wendel Oliveira Araujo<sup>1</sup>*

*Samir Herick Menezes da Cruz<sup>2</sup>*

*Deivson Nacim Teixeira Sousa<sup>3</sup>*

*Ariston de Lima Cardoso<sup>4</sup>*

*Ossival Lolato Ribeiro<sup>5</sup>*

### Resumo

O estudo teve como objetivo avaliar a fenologia da soja por meio dos índices espectrais NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDMI (Normalized Difference Moisture Index) derivados de imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2, correlacionando-os com dados pluviométricos durante a safra agrícola de 2021/2022, em São Desidério, Bahia. Caracterizou-se como uma pesquisa aplicada quanto aos seus fins, buscando fornecer informações práticas para o manejo agrícola baseado em sensoriamento remoto, e exploratória-descritiva quanto aos meios, utilizando-se métodos quantitativos e técnicas específicas de geoprocessamento e análise multiespectral. Os procedimentos metodológicos compreenderam inicialmente a obtenção e análise de dados primários representados por imagens Sentinel-2, coletadas em seis datas estratégicas, cobrindo etapas-chave do ciclo fenológico da soja, desde a emergência das plantas até após a colheita. Essas imagens passaram por um rigoroso pré-processamento no software QGIS 3.16.16, incluindo correções atmosféricas, aplicação de máscara de nuvens e extração dos valores médios dos índices espectrais na área cultivada. Adicionalmente, dados secundários foram adquiridos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), relacionados à precipitação acumulada diária e mensal, visando estabelecer relações claras entre as condições ambientais e os padrões espectrais observados nas imagens. Para análise e interpretação dos dados, foram calculados os índices NDVI e NDMI, sendo esses valores médios analisados estatisticamente ao longo do ciclo da cultura. A abordagem estatística incluiu o uso do teste de correlação de Pearson, com o objetivo de avaliar quantitativamente a associação entre os índices espectrais e os registros pluviométricos, permitindo interpretar a influência direta das variações de umidade sobre o desenvolvimento da soja. Os resultados indicaram claramente que o índice NDVI alcançou um pico máximo de 0,9245 no período correspondente ao maior vigor vegetativo da cultura, refletindo sua capacidade robusta para monitorar o desenvolvimento fenológico. Por outro lado, o NDMI apresentou valores que acompanharam a dinâmica hídrica ao longo da safra, evidenciando uma correlação positiva moderada ( $r=0,6349$ ) com os dados pluviométricos acumulados. Isso demonstrou que períodos de maior disponibilidade hídrica resultaram em incrementos significativos na umidade foliar detectável remotamente por meio desse índice. Concluiu-se que a integração dos índices NDVI e NDMI é eficaz na descrição e compreensão detalhada da fenologia da soja, permitindo uma análise mais precisa da condição vegetal e da influência climática, especialmente em regiões agrícolas importantes, como o oeste da Bahia. O estudo reforça a relevância dos índices espectrais como ferramentas estratégicas no suporte a decisões agrícolas relacionadas ao manejo hídrico, fitossanitário e nutricional, sendo recomendável sua adoção no monitoramento sistemático e no planejamento agrícola regional.

**Palavras-chave:** Fenologia Agrícola; Índices Espectrais; NDMI; NDVI; Sensoriamento Remoto; Sentinel-2; Soja.

### Abstract

The study aimed to evaluate soybean phenology through the spectral indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDMI (Normalized Difference Moisture Index), derived from Sentinel-2 satellite imagery, correlating them with rainfall data during the 2021/2022 crop season in São Desidério, Bahia. It was characterized as applied research in terms of its purpose, aiming to provide practical information for remote sensing-based agricultural management, and exploratory-descriptive regarding its means, employing quantitative methods along with specific geoprocessing and multispectral analysis techniques. The methodological procedures initially involved obtaining and analyzing primary data represented by Sentinel-2 images collected at six strategic dates, covering key stages of the soybean phenological cycle, from plant emergence to post-harvest. These images underwent rigorous preprocessing using QGIS 3.16.16 software, including atmospheric corrections, cloud masking, and extraction of mean values of the spectral indices in the cultivated area. Additionally, secondary data related to daily and monthly accumulated rainfall were obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) to establish clear relationships between environmental conditions and the spectral patterns observed in the images. For data analysis and interpretation, NDVI and NDMI indices were calculated, with their mean values statistically analyzed throughout the crop cycle. The statistical approach included Pearson's correlation test to quantitatively assess the association between spectral indices and rainfall records, enabling interpretation of the direct influence of moisture variations on soybean development. The results clearly indicated that the NDVI reached a maximum peak of 0.9245 during the period corresponding to the highest vegetative vigor of the crop, reflecting its robust capability to monitor phenological development. Conversely, the NDMI presented values aligned with the water dynamics throughout the crop cycle, demonstrating a moderate positive correlation ( $r=0.6349$ ) with accumulated rainfall data. This indicated that periods of greater water availability resulted in significant increases in leaf moisture, remotely detectable through this index. It was concluded that the integration of NDVI and NDMI indices is effective for detailed description and understanding of soybean phenology, allowing more precise analysis of vegetation condition and climatic influence, particularly in important agricultural regions such as western Bahia. The study underscores the relevance of spectral indices as strategic tools in supporting agricultural decision-making related to water, phytosanitary, and nutritional management, recommending their adoption for systematic monitoring and regional agricultural planning.

**Keywords:** Agricultural Phenology; NDMI; NDVI; Remote Sensing; Sentinel-2; Soybean; Spectral Indices.

<sup>1</sup> Mestrando em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). E-mail: [ralpharaujo2015@gmail.com](mailto:ralpharaujo2015@gmail.com)

<sup>2</sup> Graduando em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). E-mail: [samirherick01@gmail.com](mailto:samirherick01@gmail.com)

<sup>3</sup> Mestrando em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). E-mail: [deivsonnacim@gmail.com](mailto:deivsonnacim@gmail.com)

<sup>4</sup> Professor da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Doutor em Geociências. E-mail: [ariston@ufrb.edu.br](mailto:ariston@ufrb.edu.br)

<sup>5</sup> Professor da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Doutor em Forragicultura e Pastagem. E-mail: [ossival@ufrb.edu.br](mailto:ossival@ufrb.edu.br)



## INTRODUÇÃO

O cultivo da soja (*Glycine max* L.) ocupa posição estratégica na agricultura brasileira, destacando-se por sua importância econômica e sua expressiva participação nas exportações do país. Dentre as regiões produtoras, o oeste da Bahia, especialmente o município de São Desidério, destaca-se pela expansão contínua das áreas cultivadas e pelo potencial produtivo elevado, impulsionado pelo clima favorável e pelas técnicas agrícolas avançadas. Contudo, desafios relacionados à variabilidade climática, especialmente quanto à disponibilidade hídrica, exigem o aprimoramento constante das ferramentas de monitoramento agrícola e ambiental.

Nesse contexto, técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente adotadas como alternativas eficientes para monitorar e avaliar o desenvolvimento fenológico das culturas, oferecendo subsídios técnicos para uma gestão agrícola mais precisa e sustentável. Entre os métodos mais utilizados, destacam-se os índices espectrais, tais como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que avalia o vigor vegetativo das plantas, e o NDMI (Normalized Difference Moisture Index), que permite monitorar o status hídrico da vegetação. O uso integrado desses índices pode fornecer informações valiosas sobre as relações entre condições ambientais e o desenvolvimento das culturas agrícolas.

Apesar da relevância crescente dessas técnicas, estudos que correlacionam índices espectrais derivados de satélites com variáveis climáticas regionais ainda são escassos, especialmente em áreas agrícolas estratégicas como o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade de preencher essa lacuna científica e tecnológica, contribuindo para um melhor entendimento das relações entre parâmetros espectrais e condições pluviométricas na fenologia da soja.

Diante disso, o presente estudo objetiva avaliar a fenologia da soja por meio dos índices NDVI e NDMI, utilizando imagens do satélite Sentinel-2 e dados pluviométricos obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no município de São Desidério, Bahia, durante a safra agrícola de 2021/2022. Para alcançar tal objetivo, o trabalho estrutura-se nas seguintes seções: inicialmente apresenta-se uma revisão bibliográfica que aborda conceitos-chave sobre a importância da soja no contexto agrícola brasileiro, além dos fundamentos teóricos dos índices espectrais e suas aplicações no monitoramento fenológico das culturas agrícolas; em seguida são detalhados os materiais e métodos utilizados, contemplando os procedimentos de aquisição, processamento e análise das imagens de satélite, bem como a coleta e tratamento estatístico dos dados pluviométricos; na seção de resultados são apresentados e discutidos os dados obtidos, destacando-se as principais tendências observadas e suas implicações práticas para o manejo agrícola; por fim, as conclusões resumem as principais contribuições do estudo, destacando



a importância dos resultados encontrados para futuras pesquisas e recomendações técnicas para o monitoramento sistemático e gestão agrícola regional.

## A CULTURA DA SOJA E SUA IMPORTÂNCIA

A soja (*Glycine max* L.) é uma planta herbácea anual, pertencente à família Fabaceae, subfamília Papilionoideae, tribo Phaseoleae. Apresenta características como: sistema radicular profundo, caule ramificado, folhas trifolioladas, com flores autógamas de coloração roxa ou branca, com vagens contendo de uma a quatro sementes, geralmente esféricas ou elipsoidais, e é uma das principais fontes globais de proteína vegetal e óleo comestível (NPARKS, 2023).

O centro de origem da soja está localizado no leste asiático, no nordeste da China, onde foi domesticada há cerca de 3.500 anos e sua domesticação resultou em alterações significativas em relação à sua forma silvestre, *Glycine soja*, como principais mudanças: sementes maiores, menor dormência e vagens menos deiscentes, facilitando a colheita e aumentando a produtividade. Essas adaptações permitiram a criação de variedades adaptadas a diferentes climas e solos (SEDIVY *et al.*, 2017).

O alto rendimento de grãos, teor de óleo e proteína, resistência a estresses bióticos e abióticos, a arquitetura da planta, uniformidade na maturação e a resistência ao acamamento conferem as principais características produtivas da soja e facilitam a colheita mecanizada (BHUIYAN *et al.*, 2024).

A soja é atualmente cultivada em escala global, refletindo sua importância econômica e alimentar. Nos últimos 60 anos, a produção mundial de soja cresceu muito, saltando de produção modesta na década de 1960 para patamares superiores a 300 milhões de toneladas anuais na atualidade (RITCHIE, 2021).

Dados da FAO indicam que a produção global de soja atingiu aproximadamente 350 milhões de toneladas em 2022, consolidando a oleaginosa como uma das principais commodities agrícolas.

Esse crescimento tem sido impulsionado, em grande parte, por três países que lideram a produção: Brasil, Estados Unidos e Argentina, os quais juntos respondem por parcela majoritária da oferta mundial de soja (USDA, 2024).

No Brasil, a primeira menção que se tem sobre a soja é de 1882, na Bahia, mas só em 1891 que novas cultivares foram introduzidas, visto que as primeiras não se adaptaram bem (ADAMA, 2021). Nas últimas décadas, o país tem se destacado pela produção do grão impulsionado pela conversão de extensas áreas no Cerrado para lavouras e assumiu nos últimos anos a posição de maior produtor mundial de soja (BRASIL DE FATO, 2024).

Na economia nacional, a soja ocupa lugar de destaque tanto em volume produzido quanto em valor. Segundo a Agência Gov (2023) a safra brasileira de 2022, mesmo impactada por secas regionais,



alcançou 120,7 milhões de toneladas, mantendo o país entre os líderes globais. No ciclo seguinte houve forte recuperação: a safra 2022/23 registrou produção recorde estimada em 154 milhões de toneladas, retomando a trajetória de crescimento (CONAB, 2023). Esse desempenho produtivo tem reflexos expressivos na economia nacional, visto que em 2023, o complexo soja representou cerca de 16% das exportações brasileiras, gerando uma receita de aproximadamente US\$ 53 bilhões (CNN BRASIL, 2024).

Além de ser exportada *in natura*, a soja é processada internamente para produção de farelo protéico (destinado majoritariamente à ração animal) e óleo vegetal (utilizado na alimentação e na fabricação de biodiesel), agregando valor dentro da cadeia (CEPEA, ABIOVE 2023).

Estima-se que cerca de dois terços da produção brasileira de soja sejam exportados como grão ou derivados, enquanto o terço restante é processado internamente para suprir as indústrias de ração e óleo. Esse dinamismo comercial evidencia a importância econômica da soja para o Brasil, tanto como fonte de divisas externas quanto como insumo estratégico para as cadeias de proteína animal e de biocombustíveis (VIEIRA FILHO, 2024).

A expansão geográfica da cultura da soja no Brasil é outro aspecto marcante nas últimas décadas. Tradicionalmente concentrada nas regiões Sul e Centro-Oeste, a sojicultura avançou para novas fronteiras agrícolas, destacando-se a região conhecida como MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Essa região, de cerrado e transição para caatinga, passou a contribuir significativamente para a produção nacional (LOAYZA, *et al.* 2023; AGROSATÉLITE, 2021).

O Oeste da Bahia, em particular, tornou-se um polo sojícola de importância crescente, com amplas fazendas altamente tecnificadas. Formosa do Rio Preto e São Desidério, municípios baianos localizados nessa região, figuram entre os maiores produtores de soja do país (IBGE, 2023).

Em 2022, Formosa do Rio Preto colheu cerca de 1,58 milhão de toneladas de soja, posicionando-se como a terceira maior produção municipal brasileira naquele ano (IBGE, 2023). São Desidério, por sua vez, também se destaca historicamente pelo alto volume produzido, alternando posições de liderança estadual com Formosa e outros municípios do MATOPIBA (IBGE, 2023).

Esse avanço da soja em novas frentes agrícolas contribuiu para que a área plantada no Brasil atingisse aproximadamente 41 milhões de hectares em 2022, um aumento de 4 milhões de ha em relação a 2020 (FORBES, 2022).

Do ponto de vista fisiológico e agrônômico, a soja é uma herbácea anual adaptada a diferentes condições climáticas nas faixas tropicais, subtropicais e temperadas. Trata-se de uma espécie fotoperiódica de dia curto, cuja transição do crescimento vegetativo para a floração é induzida por dias com menor duração luminosa (CÂMARA *et al.*, 1997). A cultura apresenta um ciclo relativamente curto,



variando tipicamente de 100 a 130 dias do plantio à maturação, a depender da cultivar e das condições ambientais (AGROPÓS, 2021).

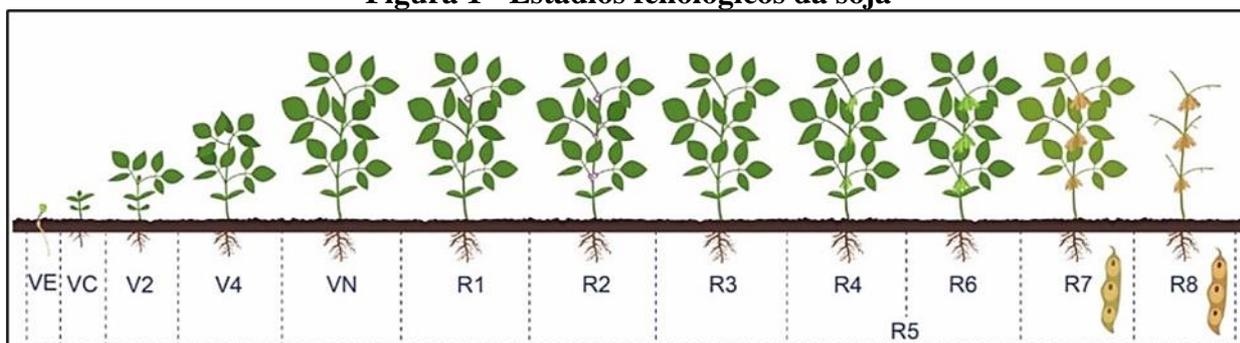
Os melhoramentos genéticos produziram cultivares de diferentes grupos de maturação, permitindo semear soja desde regiões equatoriais até latitudes médias, ajustando o ciclo às janelas de clima favorável de cada local (EMBRAPA, 2019).

Outra característica agrônômica relevante da soja é sua capacidade de realizar fixação biológica de nitrogênio atmosférico em associação com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*), suprimindo grande parte de sua necessidade desse macronutriente. Essa capacidade dispensa a aplicação de altas doses de fertilizantes nitrogenados, tornando a cultura mais sustentável e contribuindo para a fertilidade do solo para cultivos subsequentes (HUNGRIA, M. *et al.*, 2020).

Em contrapartida, a soja é exigente em fertilidade fosfatada e potássica, demandando correções de solo e adubações adequadas para alcançar altos rendimentos. Em solos tropicais ácidos, a calagem e a gessagem são práticas comuns no preparo das áreas de soja, garantindo condições químicas favoráveis às raízes (VELOSO *et al.*, 2007).

Durante seu ciclo, a soja passa por fases fenológicas bem demarcadas (NEUMAIER *et al.*, 2000). A metodologia que descreve os estádios de desenvolvimento foi proposta por Fehr e Caviness (1977) e divide os estádios de desenvolvimento de soja em vegetativos e reprodutivos. Os estádios vegetativos são designados pela letra V e os reprodutivos pela letra R. Com exceção dos estádios VE (emergência) e VC (cotilédone), como observa-se nas Figura 1 e Quadro 1.

**Figura 1 - Estádios fenológicos da soja**



Fonte: Schwab; Alff (2013). Adaptada por Santos (2025).

Cada estágio fenológico da soja está associado a práticas de manejo da cultura como aplicação de fertilizantes, defensivos, vulnerabilidades particulares (por exemplo, a fase de floração e enchimento de grãos é sensível a déficit hídrico e tombamento de plantas). O conhecimento sobre o calendário fenológico da espécie cultivada é essencial para planejamento agrícola e prognósticos de safra (OLIVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2016).



**Quadro 1 - Descrição sumária dos estádios vegetativos da soja**

Estádio	Denominação	Descrição
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
VC	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
V1	Primeiro nó	Folhas unifolioladas completamente desenvolvidas
V2	Segundo nó	Primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V3	Terceiro nó	Segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida
V4	Quarto nó	Terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V5	Quinto nó	Quarta folha trifoliolada completamente desenvolvida
V6	Sexto nó	Quinta folha trifoliolada completamente desenvolvida
Vn	Enésimo nó	Ante-enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule (haste principal)
R2	Florescimento pleno	Uma flor aberta num dos 2 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R3	Início da formação da vagem	Vagem com 5mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R4	Vagem completamente desenvolvida	Vagem com 2cm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R5	Início do enchimento do grão	Grão com 3mm de comprimento em vagem num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R6	Grão cheio ou completo	Vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades da vagem de um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R7	Início da maturação	Uma vagem normal no caule com coloração de madura
R8	Maturação plena	95% das vagens com coloração de madura

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Farias, Nepomuceno, Neumaier (2007).

A caracterização dos estádios de desenvolvimento da planta de soja é fundamental para a descrição dos vários períodos que a lavoura atravessa durante o ciclo da cultura, tal qual a utilização de novas tecnologias que juntas possibilitam uma maior agilidade na tomada de decisões para o manejo correto na cultura da soja (NEUMAIER *et al.*, 2000).

Como uma grande cultura a soja, por ser comumente cultivada em larga escala e em diversos sistemas de monocultivo ou rotação bienal, enfrenta desafios fitossanitários importantes pragas e doenças como a ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), a qual pode causar severas perdas de produtividade se não controlada (SEIXAS, *et al.* 2020). Tais ameaças reforçam a necessidade de monitoramento constante das lavouras durante o ciclo, seja via inspeções de campo ou com apoio de tecnologias remotas, para detecção precoce de estresses bióticos e abióticos.

A cultura da soja apresenta elevada importância econômica global e nacional, combinando um ciclo relativamente curto, exigências técnicas de manejo e forte interação com fatores ambientais. No Brasil, a soja foi responsável por alavancar o crescimento do agronegócio e a interiorização da fronteira agrícola, gerando riqueza e também debates sobre sustentabilidade (EMBRAPA, 2023). Esse contexto demanda ferramentas modernas de acompanhamento da lavoura que auxiliem produtores e pesquisadores a maximizar a produção com responsabilidade ambiental.



## TECNOLOGIAS APLICADAS AO MONITORAMENTO AGRÍCOLA

O sensoriamento remoto tem revolucionado o monitoramento agrícola ao permitir a coleta de informações sobre cultivos à distância, sem contato direto, usando sensores instalados em satélites, aeronaves ou veículos aéreos não tripulados (VANTs) (SHIRATSUCHI *et al.*, 2014).

Essa tecnologia baseia-se na detecção da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos na superfície terrestre. Cada tipo de cobertura (vegetação, solo, água, etc.) possui assinaturas espectrais características refletindo e absorvendo a radiação de modo distinto em diferentes comprimentos de onda (NEGRI *et al.*, 2020).

Imagens multiespectrais capturadas por satélites agrícolas medem a reflectância em bandas do visível (azul, verde, vermelho) e do infravermelho (próximo infravermelho, infravermelho de ondas curtas, entre outras), compondo um retrato spectral da vegetação (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Por meio dessas imagens, é possível inferir propriedades da cultura e seu estado de desenvolvimento, já que plantas vigorosas e saudáveis tendem a refletir muita energia no infravermelho próximo e absorver no vermelho (devido à clorofila), enquanto vegetação escassa ou estressada apresenta padrões de reflectância diferentes (MARIN *et al.*, 2019).

A aplicação do sensoriamento remoto na agricultura tem se beneficiado de avanços significativos em plataformas orbitais e processamento de dados. Atualmente, há diversos satélites em operação fornecendo imagens de alta frequência e resolução adequadas ao monitoramento de lavouras (BARROS *et al.*, 2023).

Dois exemplos de grande destaque são o Landsat e o Sentinel-2. O Programa Landsat, desenvolvido pela NASA/USGS, disponibiliza uma série histórica de imagens desde a década de 1970, com resolução espacial de 30 metros em múltiplas bandas espectrais e revisita aproximada de 16 dias. As gerações atuais (Landsat 8 e 9) possuem bandas no visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, entre outras, permitindo a derivação de diversos índices de vegetação e indicadores de superfície (LI *et al.*, 2020).

O Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia (ESA) dentro do programa Copernicus, opera com dois satélites (2A e 2B) fornecendo imagens com resolução de até 10 metros em bandas visíveis e NIR (e 20 m nas bandas de SWIR), com um curto intervalo de revisita de 5 dias (SUHET, 2015).

A disponibilidade gratuita e aberta desses dados (tanto Landsat quanto Sentinel) democratizou o uso de imagens de satélite no setor agrícola, permitindo que instituições de pesquisa, órgãos governamentais e até produtores rurais e empresas privadas utilizem as imagens para acompanhamento de safras em grande escala (OLIVEIRA *et al.*, 2019).



Um conceito-chave extraído dessas imagens são os índices espectrais de vegetação. Índices de vegetação são combinações matemáticas de reflectâncias em diferentes bandas projetadas para realçar certas características da cobertura vegetal, suprimindo efeitos de fatores externos (como solo exposto ou iluminação variável) (MA *et al.*, 2024).

Dentre os inúmeros índices existentes, os mais difundidos baseiam-se na razão entre bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (R), pois exploram o contraste marcante entre a alta reflectância da vegetação no NIR e a baixa reflectância no vermelho (absorvido pela clorofila). Assim, índices como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), definido classicamente como  $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ , tornaram-se amplamente utilizados para quantificar o vigor vegetativo e a densidade da vegetação em imagens orbitais (LI *et al.*, 2023).

Valores positivos altos de NDVI (próximos a 1,0) indicam dosséis densos e saudáveis, enquanto valores próximos de zero ou negativos indicam solo exposto, vegetação esparsa ou áreas não vegetadas (USDA, 2024).

Outros índices derivados, como o EVI (Enhanced Vegetation Index), foram propostos para reduzir influências do solo e da saturação em áreas de biomassa muito alta – o EVI incorpora bandas adicionais (azul) e fatores de calibragem para aprimorar a sensibilidade em vegetação densa. De modo similar, para avaliar condições hídricas, índices como o NDMI (Normalized Difference Moisture Index) combinam o infravermelho próximo com o infravermelho de ondas curtas (SWIR), sensível ao conteúdo de água nas folhas, de forma análoga:  $NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$  (HUETE, 1988; HUETE, *et al.*, 2002; LEMENKOVA; DEBEIR, 2023).

Em suma, os índices espectrais funcionam como “tradutores” da assinatura espectral em informações biofísicas de interesse agrônomo, como teor de clorofila, biomassa verde e umidade da vegetação. As aplicações práticas do sensoriamento remoto na cultura da soja são inúmeras e vêm se expandindo rapidamente com a evolução tecnológica (MERCANTE *et al.*, 2009).

Uma das aplicações consolidadas é o mapeamento de área plantada e detecção de culturas. Séries temporais de índices de vegetação têm sido empregadas para distinguir lavouras de soja de outras culturas e de vegetação nativa, inclusive permitindo estimativas independentes das áreas cultivadas em determinadas safras (SANTOS *et al.*, 2014).

Órgãos como a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utilizam imagens de satélite operacionalmente para acompanhar o avanço do plantio e da colheita de grãos no país, aumentando a acurácia de prognósticos de safra (CONAB, 2024).

Outra frente de aplicação é o monitoramento de condições de lavoura e previsão de produtividade. Estudos recentes integrando dados orbitais de NDVI com modelos estatísticos ou de aprendizado de



máquina demonstraram boa correlação entre os índices durante o ciclo e os rendimentos de grãos obtidos ao final (AMARAL *et al.*, 2024).

Por exemplo, Andrade *et al.* (2022) testaram modelos de regressão linear múltipla com NDVI de diferentes estádios da soja para prever a produtividade final, obtendo erros abaixo de 5% em fazendas do Piauí.

Isso evidencia que a evolução dos índices de vegetação ao longo da safra carrega o sinal integrado de fatores como stand de plantas, desenvolvimento foliar, estresse hídrico e sanidade, os quais determinam a produção. Adicionalmente, o sensoriamento remoto tem se mostrado útil na detecção de estresses e manejo sítio-específico. Imagens multiespectrais de alta resolução podem identificar, dentro de uma mesma propriedade, áreas com desempenho vegetativo abaixo do esperado, servindo como alerta para possíveis problemas (pragas, doenças, deficiência nutricional ou falhas de plantio (SCHAPARINI *et al.*, 2020).

Silva *et al.* (2023) mostraram que mapas de NDVI e EVI gerados ao longo do ciclo da soja permitiram discriminar diferentes fases fenológicas e identificar parcelas com potenciais problemas de desenvolvimento, fornecendo subsídios para intervenções localizadas.

Outra área em ascensão é o uso de dados de umidade e temperatura derivados de sensores orbitais, em conjunto com índices de vegetação, para avaliar a condição hídrica da lavoura. O NDMI, citado anteriormente, é particularmente interessante para monitorar seca agrícola, pois responde à quantidade de água na vegetação: valores altos de NDMI indicam plantas com bom suprimento hídrico, enquanto valores baixos podem sinalizar estresse por seca (TOMAZONI; GUIMARÃES, 2023).

Pesquisas têm integrado séries de NDVI (vigor) e NDMI (umidade) para criar sistemas de alerta de seca e estimar impactos na produtividade antes da colheita (PADNYA *et al.* 2023). A combinação de múltiplos índices e até de diferentes sensores (como dados de radar, que “enxergam” a estrutura do dossel e umidade do solo independentemente de nuvens) configura o estado da arte no monitoramento agrícola, dando origem a abordagens de agricultura de precisão e gerenciamento de risco climático cada vez mais refinadas (LAKRA *et al.*, 2025).

As tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas à agricultura oferecem visão sinótica e multitemporal das lavouras de soja, complementando o monitoramento tradicional. Elas viabilizam acompanhar grandes extensões de plantio de forma frequente, identificar padrões espaciais e temporais no desenvolvimento das plantas e antecipar possíveis problemas (AMARAL *et al.*, 2024).

No Brasil, onde a sojicultura é extensiva, essas ferramentas têm sido incorporadas tanto em âmbito governamental (estimativas oficiais de safra, zoneamentos agrícolas de risco) quanto nas estratégias privadas de manejo (por cooperativas, consultorias e produtores), com resultados promissores em



economia de insumos, aumento de produtividade e mitigação de impactos adversos (SCHORR *et al.*, 2023).

A popularização recente de plataformas digitais e algoritmos acessíveis para processamento de imagens (muitas vezes de código aberto) torna o uso do sensoriamento remoto mais democrático, permitindo que mesmo usuários não especializados obtenham informações relevantes de imagens de satélite (EMBRAPA, 2015). Contudo, é fundamental compreender os princípios por trás dos índices de vegetação utilizados, suas vantagens e limitações.

## ÍNDICES ESPECTRAIS NO MONITORAMENTO AGRÍCOLA - NDVI E NDMI

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, é possivelmente o índice de vegetação mais consagrado e utilizado no monitoramento agrícola e ambiental. Proposto há cerca de 50 anos por pesquisadores da NASA (ROUSE *et al.*, 1974) permanece amplamente adotado por sua simplicidade de cálculo e interpretabilidade. Sua fórmula, conforme mencionado, utiliza as reflectâncias do vermelho (R) e do infravermelho próximo (NIR).

Os valores resultantes variam teoricamente de -1 a +1, onde valores próximos de zero ou negativos indicam ausência de vegetação verde (por exemplo, solo exposto, água ou áreas urbanas refletem mais no vermelho do que no infravermelho, produzindo NDVI baixo ou negativo), enquanto valores positivos elevados indicam dosséis vegetais densos e vigorosos (FIOCRUZ, 2023).

Em termos gerais, pode-se classificar o NDVI conforme intervalos: valores abaixo de ~0,1 correspondem a superfícies sem cobertura vegetal significativa; valores entre 0,2 e 0,5 indicam vegetação esparsa a moderada; e valores acima de 0,6 evidenciam vegetação densa de alto vigor (FIOCRUZ, 2023).

Nas lavouras de soja, por exemplo, é comum o NDVI atingir picos em torno de 0,8 durante o florescimento e enchimento de grãos, quando o dossel cobre totalmente o solo e as plantas apresentam máxima atividade fotossintética, enquanto no início e final do ciclo os valores caem para abaixo de 0,3 devido à vegetação ainda rala (pós-plantio) ou à senescência (pré-colheita) (BARIANI *et al.*, 2015).

As vantagens do NDVI residem em sua robustez e ampla validação científica. Por ser um índice adimensional normalizado, ele tende a se correlacionar bem com parâmetros biofísicos da vegetação, como biomassa verde, índice de área foliar (IAF) e produtividade potencial, especialmente em estágios iniciais e intermediários de crescimento (JUNGES *et al.*, 2019).

Além disso, por se basear apenas em duas bandas, o NDVI é facilmente derivado de praticamente qualquer sensor multiespectral (daí sua longevidade e comparabilidade histórica, notadamente com as



séries Landsat). Trata-se de uma métrica intuitiva (NDVI altos equivalem a “verde” vigoroso, NDVI baixos a “marrom” ou solo) o que facilita sua interpretação por técnicos e produtores (USGS, 2023).

No entanto, o NDVI apresenta também limitações importantes. Uma delas é a saturação em condições de alta biomassa: quando a vegetação atinge um dossel fechado muito denso, acréscimos adicionais de biomassa ou IAF não se traduzem em aumentos proporcionais do NDVI, que tende a assintotar próximo de um valor máximo (tipicamente em torno de 0,8–0,9). Isso ocorre porque, com solo completamente coberto, a reflectância no vermelho já é minimamente baixa e a no NIR maximamente alta, reduzindo a sensibilidade do índice a variações posteriores (REHMAN *et al.*, 2022; SA *et al.*, 2024).

Por essa razão, o NDVI pode perder sensibilidade para distinguir, por exemplo, uma lavoura boa de uma excelente na fase de máximo florescimento, já que ambas apresentarão NDVI próximo ao teto. Outra limitação decorre da influência do solo exposto e resíduos (palha) na leitura do NDVI, sobretudo em estágios de cobertura parcial do solo (EL-MAGD *et al.*, 2023).

Em fases iniciais da soja, quando as plantas cobrem apenas uma pequena fração do terreno, a assinatura espectral captada pelo sensor é uma mistura do sinal da vegetação com o do solo descoberto. Nesses casos, um NDVI baixo pode refletir mais a porcentagem de solo aparente do que a saúde das plantas em si (FARIAS *et al.*, 2023).

De modo análogo, após a colheita, restos culturais no solo podem elevar ligeiramente o NDVI em comparação a solo totalmente nu, sem que haja de fato vegetação ativa. Tais efeitos de “mistura espectral” exigem cautela na interpretação do NDVI, conforme alertado por estudos recentes: é crucial discernir se um dado valor de NDVI advém predominantemente de biomassa verde da cultura ou de elementos de fundo, sob pena de análises equivocadas (LOPATKA *et al.*, 2024).

Em soja, Embrapa (CRUSIOL *et al.*, 2024) salientou que grande parte da variação do NDVI observado no campo decorre da proporção de cobertura do solo e da massa foliar, e não de alterações intrínsecas de teor de clorofila ou estresse, o que pode levar à subestimação de problemas como deficiência hídrica se o dossel ainda estiver fechado.

Por isso, recomenda-se por vezes o uso combinado de NDVI com outros índices ou bandas (como o EVI, que corrige parcialmente influências de solo) para um diagnóstico agrônômico mais seguro em certos cenários (LI *et al.*, 2025).

Já o NDMI (Normalized Difference Moisture Index), Índice de Umidade por Diferença Normalizada foi introduzido para avaliar o teor de água na vegetação usando informações espectrais do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas. A premissa é que a reflectância no SWIR diminui quando há mais água nos tecidos foliares (a água absorve fortemente o SWIR), enquanto a



reflectância no NIR se mantém relacionada à estrutura interna e biomassa da planta (USGS, 2023). Assim, o NDMI realça variações na umidade da vegetação através da razão normalizada entre NIR e SWIR.

De forma análoga ao NDVI, seus valores também oscilam entre -1 e +1, seguindo interpretação própria: valores altos de NDMI (próximos de +1) indicam que a vegetação está com alto conteúdo hídrico (situação típica após períodos chuvosos, com plantas turgescendo), ao passo que valores baixos denotam redução da água na biomassa vegetal, sugerindo estresse hídrico ou seca. Áreas de solo exposto ou água livre tendem a apresentar NDMI negativo, pois o solo seco reflete mais no SWIR do que no NIR, enquanto corpos d'água refletem muito pouco em NIR (resultando em denominador dominado pelo SWIR) (EOS, 2023)

Na prática agrícola, o NDMI funciona como um indicador espacial da disponibilidade hídrica: mapas de NDMI sobre um talhão podem revelar locais onde as plantas estão mais hidratadas ou mais estressadas pela falta de água (LYKHOVYD *et al.*, 2024).

Estudos demonstram que após um período prolongado sem chuvas, o NDMI de áreas cultivadas cai acentuadamente, servindo como um alerta precoce de seca agrícola e possivelmente orientando ações como irrigação suplementar onde disponível. Por exemplo, Mimić *et al.* (2022) observaram em regiões agrícolas da Sérvia que o NDMI médio em pleno verão distinguiu claramente os anos severamente secos, estando associado a quedas de produtividade em milho e girassol, onde os autores desenvolveram até um índice de estresse de cultura baseado no NDMI para prever perdas de rendimento em função da seca (MIMIĆ *et al.*, 2022).

Essas evidências ressaltam a utilidade do NDMI como índice de seca: ele pode ser incorporado em sistemas de monitoramento para identificar, dentro de uma safra, áreas sob risco hídrico antes que os efeitos se reflitam integralmente na biomassa (e, portanto, no NDVI). Entretanto, o NDMI também possui algumas particularidades a considerar. Como envolve bandas do SWIR, a resolução espacial em alguns satélites é menor (por exemplo, no Sentinel-2 as bandas SWIR são de 20 m, contra 10 m do NIR e RGB), o que pode limitar um pouco a detecção de detalhes finos em comparação ao NDVI. Além disso, o NDMI é mais sensível à presença de nuvens e umidade atmosférica, pois a banda SWIR sofre interferência de vapor d'água e embora nos produtos de refletância de superfície esse efeito seja em grande parte corrigido, alguns ruídos podem persistir (USGS, 2023).

De toda forma, suas vantagens superam em muito essas questões quando o objetivo é monitorar condição hídrica: diferentemente do NDVI, que pode permanecer elevado mesmo com deficiência moderada de água (até que a planta comece a amarelar ou reduzir área foliar), o NDMI tende a responder mais rapidamente à perda de umidade nas folhas, funcionando como um sinal de alerta antecipado de estresse hídrico (MURIGA *et al.*, 2023).



Em culturas como a soja, que têm janela reprodutiva crítica para disponibilidade de água (florescimento e enchimento de grãos), essa capacidade de detecção precoce é valiosa. Por exemplo, em uma lavoura irrigada vs. sequeiro, o NDMI pode ajudar a mapear as áreas bem supridas de água (mantendo NDMI alto) em contraste com as áreas que começam a sofrer déficit (NDMI em queda), orientação que pode guiar manejos diferenciados (SILVA *et al.*, 2023).

Em termos de aplicações práticas no monitoramento da soja, NDVI e NDMI são frequentemente utilizados de forma complementar. O NDVI fornece a visão geral do vigor e desenvolvimento vegetativo, permitindo acompanhar se a cultura está se estabelecendo bem, alcançando cobertura adequada e acumulando biomassa conforme o esperado em cada fase. Já o NDMI acrescenta a dimensão da condição hídrica, ajudando a distinguir situações em que uma eventual redução do NDVI é devida ao processo natural de maturação ou, alternativamente, causada por estresse por falta de água antes do momento fisiológico esperado (JONES *et al.*, 2024).

Em um cenário ideal de cultivo sob boas condições, espera-se que o NDVI da soja aumente rapidamente após a emergência, atinja pico próximo à metade do ciclo (entre R2 e R5) e depois decline gradualmente até a colheita, enquanto o NDMI deve permanecer alto durante todo o período chuvoso e só cair significativamente no final do ciclo, quando as chuvas cessam e as plantas entram em senescência. Caso ocorra uma seca atípica ou deficiência hídrica no meio do ciclo, é provável que o NDMI mostre um declínio acentuado concomitante ou anterior a uma queda do NDVI, sinalizando que a perda de vigor está associada à falta de água. Isso torna possível, através da análise conjunta desses índices, diferenciar um amarelecimento por maturação natural de um por estresse hídrico prematuro (SILVA *et al.*, 2023; BASTIELLA. 2023).

Em resumo, o NDVI atua como um termômetro do “verde”, ao passo que o NDMI funciona como um higrômetro do dossel, isto é, a leitura integrada de ambos fornece uma avaliação mais completa da situação da lavoura. Vale mencionar que a interpretação de NDVI e NDMI deve sempre levar em conta o contexto fenológico e climático (BASTIELLA, 2023). Valores absolutos dos índices podem variar conforme o solo de fundo, a cultivar (que pode ter coloração foliar distinta) e mesmo a geometria solar/sensor na imagem. Por isso, análises baseadas em anomalias ou desvios em relação ao padrão esperado costumam ser mais robustas. Em particular no monitoramento fenológico, interessa observar quando e quanto os índices atingem seus valores máximos e mínimos ao longo da safra, comparando com o calendário fenológico típico (SILVA *et al.*, 2023).

Qualquer divergência, por exemplo: NDVI não atingindo o patamar esperado na floração, ou NDMI caindo muito antes do fim das chuvas, acende um sinal de alerta que deve ser verificado em campo junto as estratégias de manejo. Dessa forma, NDVI e NDMI funcionam como indicadores remotos do



andamento do ciclo da soja, permitindo correlacionar as curvas temporais desses índices com eventos fenológicos (pico de floração, início da maturação) e com variáveis agronômicas (como índice de área foliar e conteúdo de água na planta) (CHECHI *et al.*, 2023). A confiabilidade dessa abordagem tem embasamento em diversos trabalhos científicos e experiências de campo recentes, o que justifica seu emprego no presente estudo para monitorar a safra de soja em questão.

## MATERIAIS E MÉTODOS

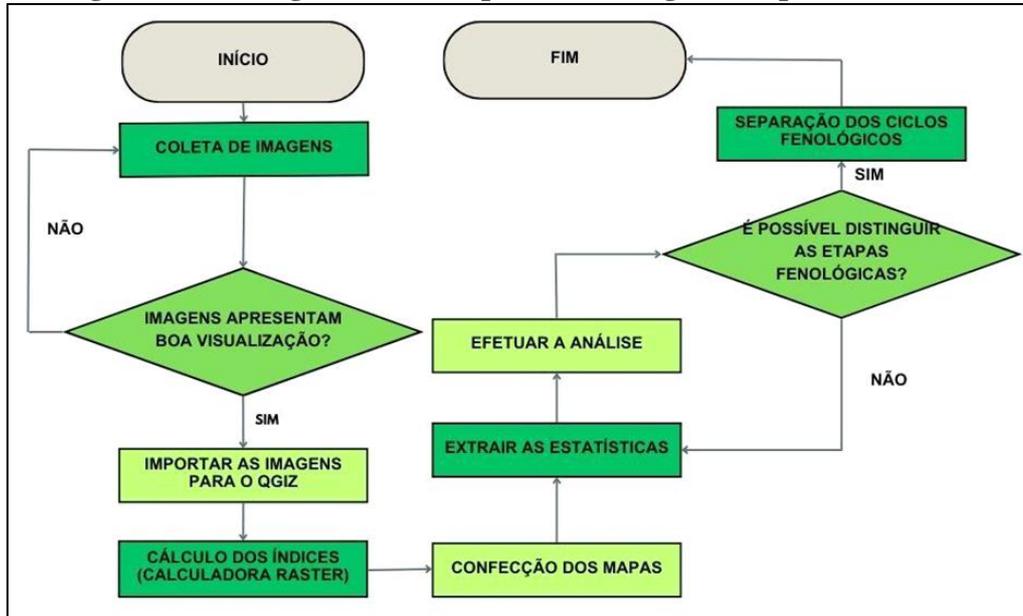
A pesquisa desenvolvida se enquadra em uma abordagem quantitativa, utilizando técnicas de sensoriamento remoto orbital com o objetivo de avaliar a fenologia da soja e sua relação com parâmetros pluviométricos ao longo da safra agrícola 2021/2022, em São Desidério, Bahia. Para tanto, foi adotado o método exploratório-descritivo, fundamentado no levantamento de informações espectrais e ambientais, buscando estabelecer relações estatísticas entre essas variáveis e as etapas fenológicas da cultura. O método escolhido é amplamente utilizado para monitorar o desenvolvimento fenológico de cultivos agrícolas, especialmente por meio da análise de índices espectrais derivados de imagens multiespectrais obtidas por sensores orbitais, tais como Sentinel-2 (SILVA *et al.*, 2023)

Os procedimentos para levantamento dos dados primários consistiram na aquisição de imagens Sentinel-2 disponibilizadas gratuitamente pela Agência Espacial Europeia (ESA), por meio da plataforma Sentinel Hub EO-Browser. Foram selecionadas seis datas estratégicas durante a safra 2021/2022, cobrindo etapas essenciais do ciclo fenológico da soja, desde a emergência das plantas até o período pós-colheita. O critério adotado para a seleção das imagens priorizou condições mínimas de cobertura de nuvens (menor que 10%), permitindo uma melhor qualidade dos dados obtidos. Cada imagem coletada foi submetida a procedimentos específicos de pré-processamento utilizando o software QGIS 3.16.16 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2022). Essas etapas incluíram correção atmosférica (algoritmo Sen2Cor), aplicação de máscaras para remoção de nuvens e sombras (bandas QA60 e SCL) e extração dos valores médios dos índices espectrais NDVI e NDMI na área cultivada, conforme metodologia recomendada em estudos recentes, conforme fluxograma adaptado de Araújo *et al.* 2024.

A seguir, as etapas apresentadas neste fluxograma, Figura 2, serão descritas de forma detalhada a fim de proporcionar entendimento geral a respeito das metodologias utilizadas no presente trabalho.



**Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas de processamento**

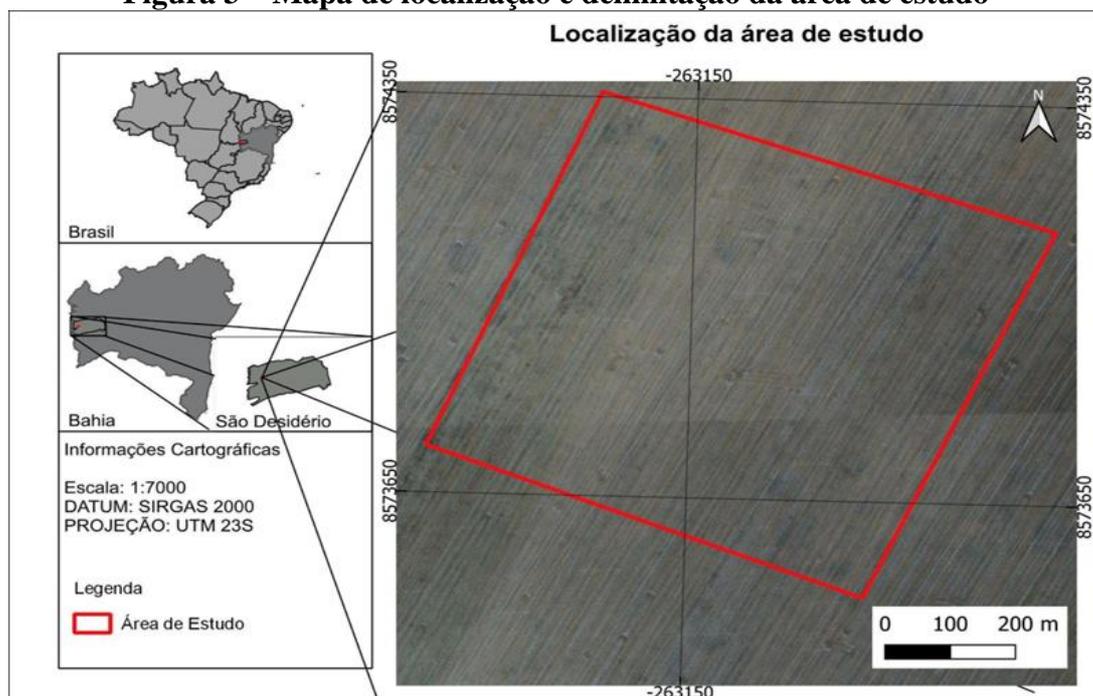


Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Araujo *et. al.* (2024).

## Delimitação da área de estudo

A pesquisa foi realizada em uma propriedade privada situada na zona rural da cidade de São Desidério no estado da Bahia, Brasil (Coordenadas geográficas: 12°48'21.0"S 46°00'55.8"W), da qual foi utilizada uma área de aproximadamente 500.000m<sup>2</sup> para realização do estudo.

**Figura 3 – Mapa de localização e delimitação da área de estudo**



Fonte: Elaboração própria.



O município localizado no oeste do estado da Bahia, destaca-se por seu vasto território e importância estratégica para o agronegócio brasileiro, sendo considerado um dos maiores produtores de grãos do país (IBGE, 2022).

De clima predominando como tropical do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com estação seca no inverno e chuvas concentradas no verão, favorece a produção de grandes culturas como soja, milho, algodão e feijão, tornando o município um polo relevante no cenário nacional da agricultura de larga escala (ALVARES *et al.*, 2013).

A região é caracterizada por relevo plano, solos férteis e abundância hídrica, especialmente devido à presença da bacia do rio Grande, afluente do rio São Francisco, que desempenha papel fundamental no abastecimento e na irrigação das áreas agrícolas (INMET, 2020).

## Captação e processamento de dados

A coleta dos dados foi realizada considerando o ciclo fenológico da cultura da soja, cuja duração média é de aproximadamente quatro meses (HUNGRIA *et al.*, 2020). O plantio da área foi iniciado em 6 de dezembro de 2023, a coleta de dados para monitoramento do desenvolvimento da cultura foi planejado para ocorrer entre dezembro de 2023 e maio de 2024.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas imagens obtidas através da biblioteca de imagens temporais do satélite Sentinel-2. Para acesso aos dados, foi utilizada a plataforma Sentinel-Hub, que fornece acesso a dados de diversos sensores orbitais.

As imagens foram selecionadas para cobrir diferentes estágios do ciclo fenológico da cultura da soja, abrangendo o período de dezembro de 2023 a maio de 2024. Foram escolhidas seis datas específicas: 10 de dezembro de 2023, 14 de janeiro de 2024, 13 de fevereiro de 2024, 9 de março de 2024, 23 de abril de 2024 e 3 de maio de 2024. A seleção dessas datas visou minimizar a interferência de cobertura por nuvens, permitindo a captura de informações relevantes sobre o desenvolvimento da cultura.

No total, foram obtidas 24 imagens, considerando quatro bandas espectrais distintas: B04 (vermelho), B08 (infravermelho próximo - NIR), B11 (infravermelho de ondas curtas - SWIR), e o RGB. Cada uma dessas bandas fornece informações valiosas sobre a vegetação e a cobertura do solo, permitindo uma análise abrangente da área estudada.

As imagens coletadas foram processadas utilizando o Quantum GIS do software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS, versão 3.16.16, que é um projeto de código aberto da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), amplamente utilizado para análise e manipulação de dados geoespaciais (EMBRAPA, 2022).



## Cálculo e análise dos índices espectrais no QGIS

No software QGIS, foi utilizada a ferramenta Calculadora Raster, disponível nativamente no programa, para a geração de dois importantes índices de vegetação utilizados no estudo: o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o NDMI (Normalized Difference Moisture Index) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI) são ferramentas amplamente empregadas no sensoriamento remoto para a avaliação da vegetação e da umidade do solo, respectivamente.

O NDVI, ao explorar a diferença entre a refletância no infravermelho próximo e no vermelho, apresenta elevada sensibilidade à presença de clorofila, sendo eficaz na identificação de diferentes tipos de cobertura vegetal e na distinção entre áreas urbanas e vegetadas.

Valores próximos de +1 indicam vegetação densa e vigorosa, enquanto valores próximos de 0 estão associados a vegetação rala ou solo exposto; já valores negativos geralmente correspondem a corpos d'água ou superfícies artificializadas (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Por sua vez, o NDMI, calculado a partir da diferença entre a refletância no infravermelho próximo e no infravermelho de ondas curtas, é amplamente utilizado para estimar o teor de umidade da vegetação e do solo.

Esse índice tem se mostrado particularmente útil na detecção de estresse hídrico, monitoramento da saúde das plantas e no delineamento de áreas úmidas, uma vez que valores elevados indicam maior conteúdo de umidade, enquanto valores mais baixos sinalizam déficit hídrico (GAO, 1996).

Ambos os índices são ferramentas valiosas na agricultura de precisão, permitindo o monitoramento eficaz do estado da vegetação e da umidade do solo. No estudo os índices foram obtidos conforme as equações:

$$(1) \quad NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

$$(2) \quad NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

Onde:

NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; NDMI = Índice de Umidade por Diferença Normalizada; NIR = banda do infravermelho próximo; - RED = banda do vermelho; SWIR = Infravermelho de bandas curtas.



Esses índices foram apresentados em mapas que mostram as variações na vegetação e umidade ao longo do ciclo da soja, tanto no espaço quanto no tempo. As imagens em RGB complementam essas análises, oferecendo uma visão adicional das mudanças ao longo do período.

Também no software QGIS, foram realizadas análises estatísticas detalhadas dos índices NDVI e NDMI para a área de 50 hectares durante os seis meses de estudo. Onde, para cada imagem, foram extraídos os valores mínimo, médio, máximo e o desvio padrão, organizando esses dados nas tabelas 1 e 2, que correspondem aos índices NDVI e NDMI, respectivamente.

## Captação dos dados pluviométricos e correlações

Para a análise final, foram coletados dados da estação pluviométrica mais próxima da área de estudo, a estação BARREIRAS [A402], correspondentes ao período entre os meses de dezembro de 2023 e maio de 2024. Por fim, os dados foram tabulados, analisados e correlacionados com os índices NDVI e NDMI.

Esses dados foram tabulados e correlacionados com os índices NDVI e NDMI, visando compreender a influência das precipitações nas variações do vigor da vegetação e na umidade do solo ao longo do ciclo de cultivo da soja.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das análises do NDVI, apresentados na Tabela 1, evidenciaram variações significativas ao longo do ciclo fenológico da soja. Observou-se um aumento consistente no valor médio do NDVI desde as datas iniciais, culminando em um pico de 0,9245 em 13 de fevereiro de 2024. Esse comportamento indica de forma robusta o período de máximo vigor vegetativo, coincidindo precisamente com as fases críticas de florescimento e início do enchimento de grãos (estádios fenológicos R2 a R5). Após esse pico, o NDVI apresentou uma queda acentuada e significativa, atingindo valores médios de 0,1470 em 23 de abril de 2024 e 0,1723 em 3 de maio de 2024. Essa tendência de declínio é indicativa do processo natural de senescência da cultura e da progressiva redução da biomassa verde à medida que a soja se aproxima da maturação plena. Esses padrões temporais são visual e quantitativamente corroborados pelo gráfico 1, que ilustram a evolução mensal do índice NDVI e do ciclo fenológico.



**Tabela 1 - Índice NDVI**

DATA	MÉDIA	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
10/12/23	0,1756	0,1044	0,2729	0,0303
14/01/24	0,5352	0,2089	0,8046	0,1972
13/02/24	0,9245	0,6342	0,9478	0,0383
09/03/24	0,8848	0,8145	0,9181	0,0124
23/04/24	0,1470	0,0552	0,3304	0,0197
03/05/24	0,1723	0,1316	0,3475	0,0264

Fonte: Elaboração própria.

Os valores de pico de NDVI observados no estudo estão em consonância com as descobertas de outras pesquisas. Bariani *et al.* (2015) relataram picos de NDVI semelhantes, em torno de 0,80, durante fases fenológicas equivalentes em soja irrigada, reforçando a forte correlação entre esse índice e o vigor vegetativo das plantas. O declínio subsequente do NDVI à medida que a cultura se desenvolve também é consistente com a literatura, que destaca a redução progressiva do índice à medida que as culturas atingem os estágios finais de seu ciclo fenológico.

Além disso, os resultados do estudo corroboram pesquisas mais amplas que enfatizam o papel crucial do NDVI na avaliação e sua forte correlação com o crescimento e a produtividade das culturas globalmente. Estudos têm consistentemente utilizado o NDVI em conjunto com fatores climáticos, como a precipitação, para compreender a dinâmica da vegetação. A aplicação do NDVI na previsão de rendimento também é bem documentada, com pesquisas como as de Andrade *et al.* (2022) e outros trabalhos demonstrando resultados promissores para a previsão do rendimento da soja utilizando o NDVI em estádios de desenvolvimento específicos (por exemplo, V5-V6 e R2) em contextos agrícolas brasileiros.

O valor de pico de NDVI de 0,9245 observado no estudo é notavelmente alto, aproximando-se do ponto de saturação conhecido para o NDVI (tipicamente entre 0,80 e 0,90) em dosséis densos. Embora isso indique um vigor vegetativo excepcional, também implica que a sensibilidade do índice a aumentos adicionais na biomassa ou a sinais precoces e sutis de estresse pode ser reduzida uma vez que o dossel esteja completamente fechado.

Essa limitação é crucial para interpretar os limites da utilidade do NDVI em campos altamente produtivos, sugerindo que valores de NDVI muito elevados podem mascarar variabilidades subjacentes ou problemas incipientes. A clara demonstração do estudo da capacidade do NDVI de rastrear a progressão fenológica, mesmo com sua limitação inerente de saturação, sublinha a necessidade crítica de índices complementares, como o NDMI. Essa abordagem multi-índice é essencial para capturar todo o espectro e variabilidade da cultura, especialmente em ambientes de alto rendimento onde o NDVI sozinho pode fornecer uma avaliação incompleta. Isso aponta para o avanço metodológico da integração de diversas informações espectrais para um monitoramento agrícola abrangente.



Em relação ao índice NDMI, observou-se um comportamento temporal semelhante ao NDVI, com um valor médio de pico de 0,3814 registrado em 13 de fevereiro de 2024, conforme Tabela 2. Esse resultado corrobora fortemente os dados pluviométricos apresentados na Tabela 3, que indicam alta precipitação (333,2 mm) durante os meses de janeiro e fevereiro. Tais períodos de elevada pluviosidade evidentemente resultaram em maior retenção hídrica na cultura, refletida diretamente nos valores elevados do NDMI. Conforme discutido por Mimić *et al.* (2022), altos valores de NDMI estão consistentemente associados a um elevado teor hídrico nas plantas, o que é crucial para fases críticas como o enchimento dos grãos.

A partir de março, com uma redução drástica nas chuvas (22,4 mm em março, caindo para 4,6 mm em maio), o NDMI apresentou um declínio abrupto, atingindo valores médios negativos em abril (-0,2456) e maio (-0,2761). Esse cenário indica claramente o início do estresse hídrico natural que precede a colheita, onde a redução da disponibilidade hídrica acelera o processo de maturação e senescência da cultura. Essas descobertas são corroboradas por observações de Lykhovyd *et al.* (2024), que enfatizam a sensibilidade do NDMI na identificação precoce de estresse hídrico, permitindo intervenções mais eficazes, particularmente em condições irrigadas. As relações entre NDMI, NDVI e precipitação são vividamente ilustradas no gráfico 1.

**Tabela 2 - Índice NDMI**

DATA	MÉDIA	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
10/12/23	-0,3175	-0,3656	-0,2649	0,0133
14/01/24	0,2034	0,0982	0,3615	0,0684
13/02/24	0,3814	0,1672	0,5472	0,0187
09/03/24	0,3019	0,2297	0,3469	0,0123
23/04/24	-0,2456	-0,3634	-0,0032	0,1024
03/05/24	-0,2761	-0,3134	-0,1902	0,0161

Fonte: Elaboração própria.

A forte associação entre altos valores de NDMI e o elevado teor de água nas plantas, observada neste estudo, é consistentemente corroborada por diversos estudos. Mimić *et al.* (2022) vincularam o NDMI à redução de rendimento em culturas afetadas pela seca, destacando sua utilidade na avaliação do estresse hídrico. Além disso, a sensibilidade superior do NDMI na detecção precoce do estresse hídrico, respondendo mais rapidamente à perda de água do que o NDVI, foi enfatizada por Lykhovyd *et al.* (2024) e Muriga *et al.* (2023). Outro estudo observa explicitamente uma correlação notável entre a umidade do solo baseada no (NDMI) e a cobertura vegetal baseada no (NDVI), o que reforça as relações observadas e valida o uso do NDMI como um indicador confiável da dinâmica da água. As faixas de interpretação para os valores do NDMI, onde valores positivos significam maior teor de umidade e valores negativos sugerem baixa umidade ou solo exposto, alinham-se diretamente com as observações do estudo de que o



NDMI cai para faixas negativas durante períodos secos, confirmando sua eficácia na identificação de padrões que denotem redução hídrica no solo.

O comportamento do NDMI demonstrou seu valor como um sistema de alerta precoce para o estresse hídrico. Observou-se um pico médio de 0,3814 em fevereiro (13/02/2024), corroborando os dados pluviométricos que indicaram elevadas precipitações em janeiro e fevereiro (333,2 mm). Essa correlação direta reflete a maior retenção hídrica na cultura durante esses meses, essencial para fases críticas como o enchimento dos grãos, conforme discutido por Mimić *et al.* (2022) que associam altos valores de NDMI a elevado teor hídrico em plantas.

Com a redução drástica das chuvas a partir de março (22,4 mm), o NDMI apresentou uma queda abrupta, atingindo valores negativos médios em abril (-0,2456) e maio (-0,2761). Esse declínio sinaliza claramente o início do estresse hídrico natural que antecede a colheita, onde a menor disponibilidade hídrica acelera a maturação e senescência da cultura. Tais achados são respaldados por Lykhovyd *et al.* (2024), que destacam a capacidade do NDMI na identificação precoce de estresse hídrico, permitindo intervenções de manejo oportunas e direcionadas, como a irrigação suplementar. Essa capacidade de detecção proativa é inestimável para a agricultura de precisão, aumentando significativamente a resiliência da cultura à seca e contribuindo para estratégias eficazes de adaptação às mudanças climáticas.

**Tabela 3 - Análise Pluviométrica**

Mês	Precipitação (mm)
Dezembro de 2023	37,2
Janeiro de 2024	333,2
Fevereiro de 2024	333,2
Março de 2024	22,4
Abril de 2024	101,2
Mai de 2024	4,6

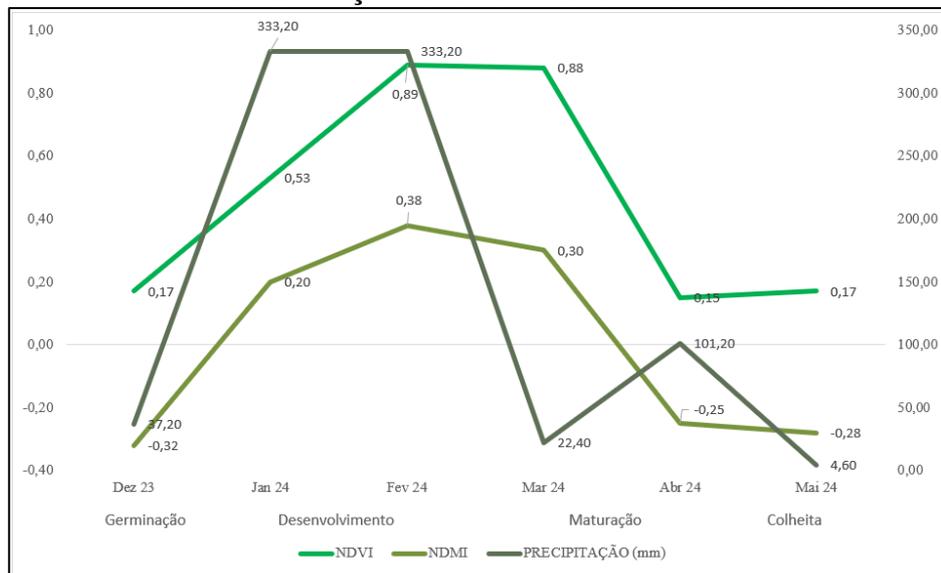
Fonte: Elaboração própria. Base de dados: INMet (2020).

Através destes dados foram obtidos os coeficientes de correlação de Pearson, que atestam e reforçam os resultados, indicando uma correlação moderada entre precipitação e NDVI (0,4802) e forte com o NDMI (0,6349). A forte correlação com NDMI ressalta o impacto direto das variações pluviométricas na umidade das plantas.

A análise apresentada no gráfico 1 demonstra claramente essas relações, evidenciando como as oscilações climáticas interferem diretamente nos índices espectrais. Este padrão é essencial para compreender a dinâmica de desenvolvimento da soja, permitindo o uso dos índices multiespectrais como ferramentas importantes para decisões no manejo agrícola, conforme abordado por Amaral *et al.* (2024).



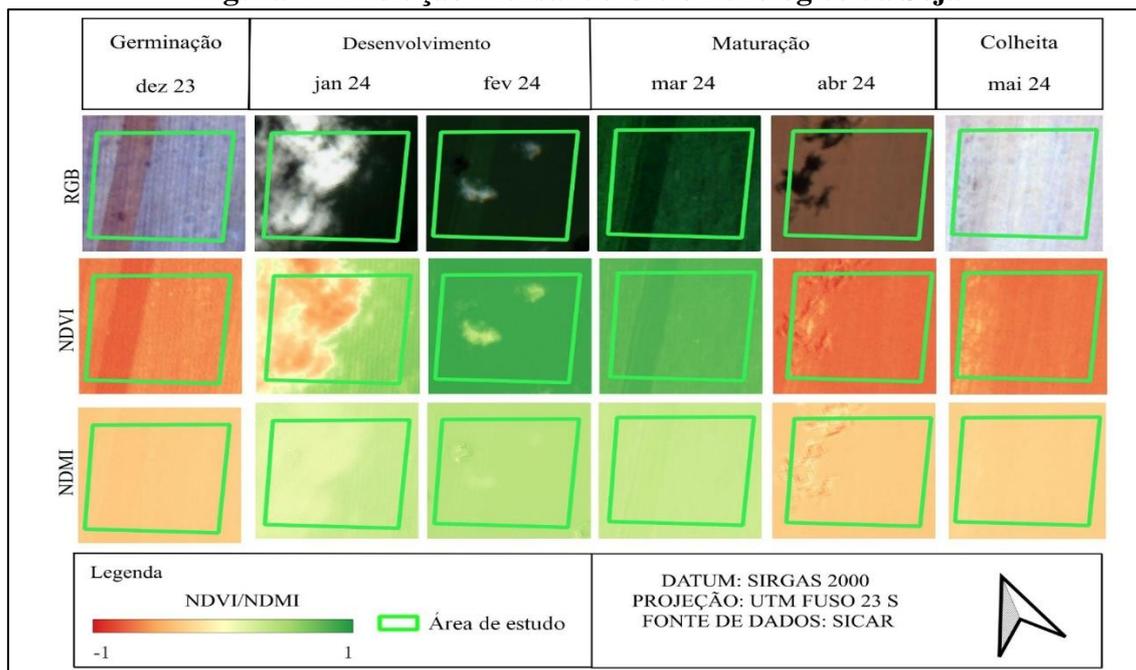
### Gráfico 1 - Evolução Mensal do índice NDVI e NDMI



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4 ilustra a evolução mensal do ciclo fenológico da soja, permitindo observar visualmente as mudanças ocorridas na área estudada ao longo do período. Nesta figura, fica evidente o vigor vegetativo crescente até fevereiro, seguido pela maturação e senescência progressiva da soja a partir de março. Tal comportamento visual complementa e confirma quantitativamente os resultados obtidos com os índices NDVI e NDMI e está alinhado com as variações pluviométricas registradas, destacando a relação direta entre fenologia, índices espectrais e regime hídrico local.

### Figura 4 - Evolução Mensal do Ciclo Fenológico da Soja



Fonte: Elaboração própria.



A utilização integrada de NDVI e NDMI, conforme demonstrado por este estudo, fornece informações para otimizar as decisões de manejo agrícola. Esses índices permitem aos agricultores implementar aplicações de taxa variável de água, fertilizantes e outros insumos com precisão sem precedentes, direcionando-os para áreas específicas do campo que mais necessitam. Isso leva diretamente a uma melhor eficiência no uso de recursos.

A análise das tendências de NDVI e NDMI ao longo da estação de crescimento contribui significativamente para previsões de rendimento mais precisas e confiáveis. A melhoria na previsão de rendimento, facilitada por técnicas avançadas de sensoriamento remoto, capacita agricultores e partes interessadas do setor agrícola com informações superiores para planejamento de mercado, gestão de riscos e otimização logística, o que, por sua vez, contribui diretamente para a segurança alimentar regional e nacional.

## CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou capacidade de integração dos índices espectrais NDVI e NDMI, derivados de imagens Sentinel-2, no monitoramento detalhado do ciclo fenológico da soja e de sua dinâmica hídrica na região de São Desidério, Bahia.

Os resultados confirmaram que o NDVI é um indicador robusto do vigor vegetativo, atingindo seu pico durante as fases de maior atividade fotossintética da cultura, enquanto o NDMI se correlacionou fortemente com os dados pluviométricos, evidenciando sua capacidade de refletir o teor de umidade da vegetação e de sinalizar o estresse hídrico.

A análise aprofundada revelou que, embora o NDVI seja um excelente indicador de biomassa, sua saturação em dosséis densos pode limitar sua sensibilidade para detectar variações sutis ou estresses precoces em campos de alta produtividade.

Por outro lado, a maior sensibilidade do NDMI às variações de umidade, e sua capacidade de declinar rapidamente em resposta à redução de chuvas, posiciona-o como um valioso sistema de alerta precoce para o estresse hídrico.

A combinação desses índices oferece uma avaliação mais completa e matizada da condição da lavoura, permitindo diferenciar o amarelecimento natural da maturação de um estresse hídrico prematuro.

As implicações desses resultados são multifacetadas e de grande importância para a agricultura moderna.

Para pesquisas futuras, é recomendada a exploração de abordagens de fusão de dados multi-sensores para superar as limitações impostas pela cobertura de nuvens e aprofundar a compreensão da



estrutura do dossel e da umidade do solo. Além disso, a integração de modelos de aprendizado de máquina e inteligência artificial podem aprimorar a interpretação automática dos dados e ajustar ainda mais os modelos de previsão de rendimento e detecção de estresse.

A continuidade de pesquisas localizadas, como a apresentada, é fundamental para adaptar e validar as tecnologias de sensoriamento remoto às especificidades regionais, garantindo que os avanços globais se traduzam em benefícios tangíveis para a agricultura em diferentes contextos.

## REFERÊNCIAS

ADAMA. “Guia completo sobre a cultura da soja”. **Portal ADAMA**, [2021]. Disponível em: <www.portaladama.com>. Acesso em: 16/04/2025.

AGÊNCIA GOV. “Valor de produção e safra de grãos batem recorde em 2022, aponta IBGE”. **Agência GOV** [2023]. Disponível em: <www.agenciagov.ebc.com.br>. Acesso em: 16/04/2025.

AGROPÓS. “Saiba os fatores que afetam o ciclo da soja!”. **AgroPós**. [2021]. Disponível em: <www.agropos.com.br>. Acesso em: 16/04/2025.

AGROSATÉLITE GEOTECNOLOGIA APLICADA LTDA. **Análise geoespacial da expansão da soja no bioma Cerrado: 2000/01 a 2020/21**. Florianópolis: ABIOVE, 2021.

ALVARES, C. A. *et al.* “Köppen's climate classification map for Brazil”. **Meteorologische Zeitschrift**, vol. 22, n. 6, 2013.

AMARAL, L. *et al.* Remote sensing imagery to predict soybean yield: a case study of vegetation indices contribution. **Precision Agriculture**, vol. 25, n. 5, 2024.

ANDRADE, T. G. *et al.* “Soybean yield prediction using remote sensing in southwestern Piauí state, Brazil”. **Revista Caatinga**, vol. 35, n. 1, 2022.

ARAÚJO, R. W. O. *et al.* “Estimativa multitemporal de biomassa em manguezais utilizando índices multiespectrais”. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 20, n. 60, 2024.

BARIANI, C. J. M. V. *et al.* “Monitoramento da fenologia da soja irrigada usando perfis de série temporal de NDVI”. **III Inovagri International Meeting**. Fortaleza: UFSM, 2015.

BARROS, P. H. B. *et al.* “Combinando Inteligência Artificial e imagens de satélite para a previsão de sinistros agrícolas: Uma nota”. **Revista Brasileira de Economia**, vol. 77, n. 1, 2023.

BHUIYAN, M. S. H. *et al.* “Aumento no desempenho de rendimento de genótipos de soja induzidos por mutação em condições agroecológicas variadas”. **Brazilian Journal of Biology**, vol. 84, n. 1, 2024.

BRASIL DE FATO. “Soja quadruplicou área plantada em 30 anos e avança sobre Amazônia e Matopiba”. **Brasil de Fato** [2024]. Disponível em: <www.brasildefato.com.br>. Acesso em: 16/04/2025.

CÂMARA, G. M. S. *et al.* “Influência do fotoperíodo e da temperatura do ar no crescimento, floração e maturação da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)”. **Scientia Agricola**, vol. 77, n. 1, 1997.



CEPEA; ABIOVE: **Cadeia da soja e do biodiesel, 1º trimestre 2024**. Piracicaba: USP, 2023.

CHECHI, L. *et al.* “Estimativa do índice de área foliar e da fração de cobertura do solo nas culturas de milho e soja Usando NDVI”. **IRRIGA**, vol. 26, n. 3, 2021.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. “Com novo recorde, produção de grãos na safra 2022/23 chega a 322,8 milhões de toneladas”. **CONAB**. [2023]. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 16/04/2025.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. “Monitoramento dos cultivos de inverno nas principais regiões produtoras mostra avanço no seu desenvolvimento”. **CONAB**. [2024]. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 16/04/2025.

CRUSIOL, L. G. T. *et al.* **50 anos do NDVI: desmistificando o índice e ponderando sua utilização para o monitoramento da soja na era digital**. Londrina: EMBRAPA, 2024.

EL-MAGD, S. A. *et al.* “Towards understanding climate change: Impact of land use indices and drainage on land surface temperature for valley drainage and non-drainage áreas”. **Journal of Environmental Management**, vol. 350, 2024.

EMBRAPA. “Sistema de Análise Temporal da Vegetação – SATVeg”. **Embrapa** [2015]. Disponível em: <www.embrapa.br> Acesso em: 15/04/2025.

EMBRAPA. **Cultivares de soja: macrorregiões 4 e 5 norte e nordeste do Brasil**. Londrina: Embrapa, 2019.

EOS. “NDMI: Fórmula de índice e interpretação de valores”. **EOS** [2023]. Disponível em: <www.eos.com>. Acesso em: 15/04/2025.

FAO - World Food and Agriculture. **Statistical Yearbook 2023**. Rome: FAO, 2023.

FARIAS, G. D. *et al.* “Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for soybean biomass and nutrient uptake estimation in response to production systems and fertilization strategies”. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, vol. 6, n. 1, 2023

FIOCRUZ. “Índice de estado da vegetação (NDVI)”. **Fiocruz** [2022]. Disponível em: <ww.fiocruz.br>. Acesso em: 20/04/2025.

FORBES. “Conab aponta nova safra de soja do Brasil acima da expectativa, recorde no milho”. **Forbes Brasil** [2022]. Disponível em: <www.forbes.com.br>. Acesso em: 15/04/2025.

GAO, B. C. “NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space”. **Remote Sensing of Environment**, vol. 58, n. 3, 1996.

HUETE, A. R. “A soil-adjusted vegetation index (SAVI)”. **Remote Sensing of Environment**, vol. 25, n. 3, 1988.

HUETE, A. R. *et al.* “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices”. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, n. 1, 2002.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. “Fixação biológica de nitrogênio”. In: Embrapa Soja. **Tecnologias de produção de soja: região Central do Brasil 2020**. Londrina: EMBRAPA, 2020.



IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. “Cidades e Estados: Luís Eduardo Magalhães”. **IBGE** [2023]. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15/04/2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2022**. Brasília: IBGE, 2022. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15/04/2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2023**. Brasília: IBGE, 2023. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15/04/2025.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Clima e Recursos Hídricos na Região Oeste da Bahia**. Brasília: INMET, 2020. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 17/04/2025.

JONES, S. E. *et al.* “Multi-Sensor and Multi-temporal High-Throughput Phenotyping for Monitoring and Early Detection of Water-Limiting Stress in Soybean”. **The Plant Phenome Journal** vol. 7, n. 1, 2024.

JUNGES, A. H. *et al.* “Relationship between the normalized difference vegetation index and biophysical parameters of grapevines”. **Agrometeorology**, vol. 79, n. 2, 2019.

LAKRA, D. *et al.* “Soil moisture retrieval over agricultural region through machine learning and Sentinel-1 observations”. **Frontiers in Remote Sensing**, vol. 3, 2025.

LEMENKOVA, P. *et al.* “O. Computing vegetation indices from the satellite images using GRASS GIS scripts for monitoring mangrove forests in the coastal landscapes of Niger Delta, Nigeria”. **Journal of Marine Science and Engineering**, vol. 11, n. 4, 2023.

LI, J. *et al.* “Global Revisit Interval Analysis of Landsat-8 -9 and Sentinel-2A -2B Data for Terrestrial Monitoring”. **Sensors**, vol. 20, n. 22, 2020.

LI, M. *et al.* “Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022”. **Earth System Science Data**, vol. 15, n. 9, 2023.

LI, Q. *et al.* “Comparison of Satellite-Derived Vegetation Indices for Assessing Vegetation Dynamics in Central Asia”. **Water**, vol. 17, n. 5, 2025.

LOAYZA, A. C. V. *et al.* “Evolução dos indicadores da produção de soja no Matopiba”. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, vol. 21, n. 12, 2023.

LOPATKA, A. *et al.* “Assessment of soil impact on pre- and post-harvest NDVI extrema by machine learning”. **Soil Science Annual**, vol. 75, n. 2, 2024.

LYKHOVYD, P. V. *et al.* “Normalised difference moisture index in water stress assessment of maize crops”. **Agrology**, vol. 7, n. 1, 2024.

MA, Y. *et al.* “Quantifying how topography impacts vegetation indices at various spatial scales”. **Remote Sensing of Environment**. vol. 303, n. 1, 2024.

MARIN, D. B. *et al.* “Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das condições de estresse em lavouras cafeeiras”. **Revista Ceres**, vol. 66, n. 2, 2019.

MERCANTE, E. *et al.* “Características espectrais da soja ao longo do ciclo vegetativo com imagens landsat 5/TM em área agrícola no oeste do Paraná”. **Engenharia Agrícola**, vol. 30, n. 1, 2009.



MIMIĆ, G. *et al.* “Quantifying the Effects of Drought Using the Crop Moisture Stress as an Indicator of Maize and Sunflower Yield Reduction in Serbia”. **Atmosphere**, vol. 14, n. 3, 2022.

MURIGA, V. W. *et al.* “A Machine Learning Approach to Long-Term Drought Prediction using Normalized Difference Indices Computed on a Spatiotemporal Dataset”. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. Pasadena: IEEE, 2023.

NEGRI, R. G. *et al.* “Sensoriamento remoto, processamento de imagens e estudos ambientais”. In: VILANOVA, M. R. N. *et al.* **Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares**. São Paulo: Editora da UNESP, 2020.

NEUMAIER, N. *et al.* “Estádios de desenvolvimento da cultura de soja”. In: BONATO, E. R. (ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa, 2000.

NPARKS. **Glycine max (L.) Merr.** Singapore: NParks-National Parks Board. 2023. Disponível em: <www.nparks.gov.sg>. Acesso em: 16/04/2025.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. *et al.* “Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja”. **Embrapa Soja** [2016]. Disponível em: <www.embrapa.br>. Acesso em: 10/05/2025.

OLIVEIRA, M. A. F. *et al.* “Avaliação de degradação e mudanças ambientais na bacia hidrográfica do Alto Ipanema”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 35, n. 4, 2020.

OLIVEIRA, S. S. **Monitoramento da cultura do algodão usando índice de vegetação e umidade da superfície** (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Agrícola). Chapadinha: UFMA, 2023.

223

REHMAN, T. H. *et al.* “Comparative sensitivity of vegetation indices measured via proximal and aerial sensors for assessing n status and predicting grain yield in rice cropping systems”. **Remote Sensing**, vol. 14, n. 12, 2022.

RITCHIE, H. “Drivers of Deforestation”. **Our World in Data** [2021]. Disponível em: <www.ourworldindata.org>. Acesso em: 16/05/2025.

ROUSE, J.W. *et al.* “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS”. **Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium**. Washington: NASA; 1974

SA, R. *et al.* “Biomass estimation and saturation value determination based on multi-source remote sensing data”. **Remote Sensing**, vol. 16, n. 12, 2024.

SANTOS, J. S. *et al.* “Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul”. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 18, n. 1, 2014.

SCHAPARINI, L. P. *et al.* “Análise comparativa entre índices de vegetação e sua relação com o balanço hídrico em soja”. **Agrometeoros**, vol. 27, n. 1, 2020.

SCHORR, M. R. W. *et al.* “Estimativa objetiva da produtividade utilizando ferramentas do sensoriamento remoto – Estudo de caso da safra de soja 2021/22 no Rio Grande do Sul”. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis: UFSC, 2023.



SEDIVY, E. J. *et al.* “Soybean domestication: the origin, genetic architecture and molecular bases”. **New Phytologist**, vol. 214, n. 2, 2017.

SEIXAS, C. D. S. **Monitoramento de Phakopsora pachyrhizi na safra 2019/2020 para tomada de decisão do controle químico da ferrugem-asiática da soja**. Londrina: Embrapa, 2020.

SENTINEL HUB. "Mapping Soybean and Maize NDVI with Sentinel-1 and Sentinel-2". **Sentinel Hub Custom Scripts**, [2025]. Disponível em: <www.sentinel-hub.com>. Acesso em: 15/04/2025.

SHIRATSUCHI, L. S. *et al.* “Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão”. In: EMBRAPA. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014.

SILVA, E. C. *et al.* “O Índices de vegetação NDVI e EVI no monitoramento do cultivo da soja no município de Querência–MT, SAFRA 2020/2021”. **Revista Contexto Geográfico**, vol. 8, n. 16, 2023.

SUHET, H. B. **Sentinel-2 User Handbook**. Paris: European Space Agency, 2015.

TEIXEIRA, A. A. D. *et al.* “Evaluation of the radiometric accuracy of images obtained by a remotely piloted aircraft system (RPAS) for the measurement of spectral reflectance and calculation of vegetation indices”. **Engenharia Agrícola**, vol. 40, n. 1, 2020.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. “Utilização de índices de vegetação para avaliação de impacto de estiagem no município de Francisco Beltrão”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 16, n. 6, 2023.

USDA - United States Department of Agriculture. “Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)”. **USDA** [2025]. Disponível em: <www.usda.gov>. Acesso em: 16/04/2025.

USDA - United States Department of Agriculture. “World Agricultural Production. Foreign Agricultural Service”. **USDA** [2024]. Disponível em: <www.usda.gov> Acesso em: 16/04/2025.

USGS. “Landsat Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)”. **USGS** [2023] Disponível em: <www.usgs.gov>. Acesso em: 16/04/2025.

VELOSO, C. A. C. *et al.* “Adubação fosfatada e potássica na cultura da soja em Latossolo Amarelo do Estado do Pará”. **Anais do 31º Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo**. Gramado: SBCS, 2007.

VIEIRA FILHO, J. E. R. “A produção de soja e sua importância na economia brasileira”. **Revista de Política Agrícola**, vol. 33, 2024.



## **BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)**

Ano VII | Volume 23 | Nº 67 | Boa Vista | 2025

<http://www.ioles.com.br/boca>

### **Editor chefe:**

Elói Martins Senhoras

### **Conselho Editorial**

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

### **Conselho Científico**

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima