

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

ERASMO NALIN NOGUEIRA

USO DE DADOS ESPECTRAIS DO SENSOR MSI/ SENTINEL 2 PARA O  
MONITORAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS TEMPORÁRIAS:  
ESTUDO DE CASO EM JUSSARA - PR.

MARINGÁ – PR

2025

**ERASMO NALIN NOGUEIRA**

**USO DE DADOS ESPECTRAIS DO SENSOR MSI/ SENTINEL 2 PARA O  
MONITORAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS TEMPORÁRIAS:  
ESTUDO DE CASO EM JUSSARA - PR.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do título de Geógrafo, junto ao Departamento de Geografia (DGE) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Orientador: Prof. Dr. Otávio Cristiano Montanher

**MARINGÁ – PR**

**2025**

ERASMO NALIN NOGUEIRA

USO DE DADOS ESPECTRAIS DO SENSOR MSI/ SENTINEL 2 PARA O  
MONITORAMENTO DA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS TEMPORÁRIAS:  
ESTUDO DE CASO EM JUSSARA - PR.

Trabalho de conclusão de curso apresentado para  
obtenção do título de Geógrafo, junto ao  
Departamento de Geografia (DGE) da Universidade  
Estadual de Maringá (UEM).

Banca examinadora:

PROF. DR. OTÁVIO CRISTIANO MONTANHER  
Presidente

PROF.(A) DR.(A) VALÉRIA LIMA  
MEMBRO

PROF. DR. AMÉRICO JOSÉ MARQUES  
MEMBRO

Maringá - PR, 31 de janeiro de 2025.

Dedico este trabalho acadêmico aos meus queridos pais, Dona Diene Eire Nalin Nogueira e Senhor Valdemar Nogueira Junior, e minhas queridas irmãs, Luma Nalin Nogueira e Gabriela Nalin Nogueira. Sua dedicação incansável e apoio incondicional têm sido meu alicerce desde o início de minha jornada na Terra. Agradeço profundamente por sempre me incentivar e me inspirar a ser uma pessoa melhor e mais justa.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Otávio Cristiano Montanher, cuja dedicação inabalável e sabedoria fizeram toda a diferença em minha jornada acadêmica e também para minha formação pessoal. Sua orientação, apoio constante, incentivo e, acima de tudo, sua amizade foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sou imensamente grato por ter tido a oportunidade de aprender com alguém tão excepcional.

Espero preservar este vínculo de camaradagem por muito tempo, transcendendo as barreiras do ambiente acadêmico e enriquecendo outras esferas da vida.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo explorar o uso de dados espectrais, com foco nos índices NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), para o monitoramento da produtividade agrícola em uma propriedade localizada no município de Jussara, Paraná. A pesquisa abrange as culturas de soja e milho, analisando um período de cinco anos (2019-2023). Os dados espectrais foram adquiridos por meio do sensor MSI do satélite Sentinel-2, utilizando a plataforma Google Earth Engine (GEE) como ferramenta de processamento e análise. A propriedade agrícola está situada próxima ao Rio Cananéia, em uma área caracterizada por solos férteis e grande relevância para o cultivo de grãos. A coleta de dados para a pesquisa contou também com informações fornecidas por uma cooperativa local, responsável pelo armazenamento e comercialização da produção agrícola, as quais serviram como referência para a interpretação dos índices. A análise baseou-se em uma avaliação temporal dos índices NDVI e NDWI, buscando compreender a dinâmica hídrica e vegetativa das culturas ao longo do período estudado. Os resultados mostraram uma correlação significativa entre os índices espectrais e a produtividade das culturas, especialmente no caso da soja, onde o NDVI apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9353, e o NDWI com o ( $R^2$ ) de 0,8761, indicando uma forte relação com a produtividade. Para o milho, o NDVI demonstrou uma correlação média, sendo ( $R^2 = 0,506$ ), embora o NDWI tenha apresentado resultados menos eficazes nesse contexto ( $R^2 = 0,0751$ ). Esses achados indicam que os índices espectrais podem ser usados como ferramentas confiáveis para monitorar a saúde das culturas e auxiliar na gestão agrícola.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto; análise temporal; culturas agrícolas; NDVI; NDWI.

## ABSTRACT

This study aims to explore the use of spectral data, focusing on the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index), for monitoring agricultural productivity on a property located in Jussara, Paraná. The research encompasses soybean and corn crops, analyzing a five-year period (2019-2023). Spectral data were obtained using the MSI sensor from the Sentinel-2 satellite, with Google Earth Engine (GEE) as a processing and analysis tool. The agricultural property is situated near the Cananéia River, in an area characterized by fertile soils and significant relevance for grain cultivation. Data collection for this research also included information provided by a local cooperative responsible for storing and commercializing agricultural production, which served as a reference for interpreting the indices. The analysis was based on a temporal evaluation of the NDVI and NDWI indices, aiming to understand the hydric and vegetative dynamics of the crops throughout the study period. The results showed a significant correlation between the spectral indices and crop productivity, especially in the case of soybeans, where the NDVI presented a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9353, and the NDWI had an  $R^2$  of 0.8761, indicating a strong relationship with productivity. For corn, the NDVI demonstrated a moderate correlation ( $R^2 = 0.506$ ), while the NDWI yielded less effective results in this context ( $R^2 = 0.0751$ ). These findings indicate that the spectral indices can be reliable tools for monitoring crop health and assisting in agricultural management.

**Keywords:** remote sensing; temporal analysis; agricultural crops; NDVI; NDWI.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	6
3.2 BASES DE DADOS.....	11
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>16</b>
4.1. ANÁLISE DOS PICOS DOS ÍNDICES ESPECTRAIS.....	23
4.1.2. NDVI.....	24
4.1.3. NDWI.....	26
4.2. RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS.....	29
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>
ANEXOS.....	34
ANEXO A - Script de Análise de Dados Espectrais.....	34

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções tecnológicas que auxiliem na gestão e tomada de decisões do espaço físico tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação das geotecnologias em diversas áreas do conhecimento, especialmente na geografia, como na gestão ambiental e no planejamento urbano. Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e o sensoriamento remoto, que englobam tecnologias voltadas ao mapeamento, processamento e análise espacial, têm se mostrado essenciais não apenas para a pesquisa acadêmica, mas também para o campo profissional da geografia. Por meio de sua aplicação, as geotecnologias permitem a tomada de decisões informadas, apoiam práticas sustentáveis, como a gestão de recursos naturais, e facilitam estudos que vão desde a compreensão das dinâmicas territoriais até o planejamento urbano e ambiental, sempre com ênfase na eficiência e precisão na análise de dados espaciais.

Nesse contexto, o geoprocessamento refere-se a um conjunto de técnicas que possibilitam o processamento e a manipulação de dados espaciais, integrando informações geográficas para gerar mapas temáticos e realizar análises complexas sobre diferentes fenômenos. O sensoriamento remoto, por outro lado, envolve a obtenção de informações sobre a superfície terrestre a partir de sensores que captam a radiação eletromagnética refletida ou emitida por objetos no solo. O sensoriamento remoto é essencial para monitorar mudanças no ambiente, no clima e na produtividade devido à sua perspectiva detalhada e em larga escala.

No setor agrícola, a relevância dessas tecnologias se intensifica. Por exemplo, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permitem a criação de mapas de aptidão agrícola, a otimização do uso do solo e o monitoramento do desenvolvimento das culturas. Além disso, o sensoriamento remoto, especialmente por meio de sensores orbitais como o Multiespectral Instrument (MSI) a bordo dos satélites Sentinel-2, possibilita o monitoramento contínuo de áreas agrícolas. Essa tecnologia captura dados espectrais que refletem a saúde e a produtividade das plantações, fornecendo informações valiosas para a gestão agrícola.

Dessa forma, as geotecnologias oferecem informações precisas e atualizadas, essenciais para os processos de tomada de decisão. O monitoramento de culturas temporárias é especialmente significativo dentro desse contexto. Essas culturas, devido ao seu ciclo curto de produção, são altamente vulneráveis a variações climáticas e condições adversas do solo, o que torna o acompanhamento contínuo essencial para maximizar a produtividade e minimizar perdas.

Neste estudo, utilizamos dados espectrais do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 para monitorar a produção de culturas sazonais, especificamente soja e milho, em uma propriedade agrícola localizada no município de Jussara, Paraná. A pesquisa busca identificar padrões de produtividade dessas culturas por meio da análise dos índices espectrais NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada). Esses índices são analisados ao longo de um período de cinco anos (2019-2023), com o objetivo de avaliar se há uma relação direta entre as variações dos índices e os dados de produção agrícola disponibilizados pela cooperativa local.

O trabalho, de caráter experimental, está fundamentado em poucos dados, que foram extraídos da área de estudo e se insere em um contexto de pesquisa inicial, com o intuito de explorar a aplicabilidade dos dados espectrais para a gestão agrícola. A análise espectral busca compreender como as oscilações nos índices ao longo do tempo podem refletir a dinâmica de crescimento e produtividade das culturas.

Embora o monitoramento agrícola contínuo ainda não seja realizado neste estudo, ele representa o objetivo final da pesquisa. A ideia é, em etapas futuras, desenvolver e calibrar modelos baseados nos dados históricos obtidos, de forma a viabilizar o uso regular desses índices para prever e monitorar a produtividade das culturas na região.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sensoriamento remoto se destaca como uma ferramenta essencial para estudos de vegetação, permitindo a captura rápida de imagens e dados espectrais em grande escala, algo difícil de obter por métodos tradicionais de campo. Por exemplo, imagens de satélite, como as geradas pelo Sentinel-2, são valiosas para monitorar a dinâmica da vegetação, avaliar a saúde das plantas e analisar o uso do solo ao longo do tempo, fornecendo informações fundamentais para o planejamento agrícola (Sano et al., 2023).

Os autores Turner, W., Lucieer, A., & Ridd, M. dão ênfase a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto, pois,

[...] oferece uma visão única da dinâmica da superfície terrestre, permitindo a aquisição de dados multi-espectrais em escalas temporais e espaciais que são impossíveis de serem obtidas através de observações terrestres tradicionais. Essa capacidade para registrar as variações no uso do solo, saúde da vegetação e características ambientais em larga escala é inestimável para a pesquisa e gestão de recursos naturais.

Diante dessas considerações, SILVEIRA (2018) dá ênfase à implementação recente de novas tecnologias, como exemplo a evolução dos sensores multiespectrais e como isso tem proporcionado avanços significativos nas resoluções espacial e espectral, especialmente em comparação com os instrumentos da série Landsat. Um exemplo marcante é o MultiSpectral Instrument (MSI), que opera a bordo dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, lançados em junho de 2015 e março de 2017, respectivamente, dentro do programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security).

Segundo Drusch et al. (2012), quanto ao lançamento do sensor MSI a bordo dos satélites,

[...] principal objetivo da missão é melhorar o monitoramento da superfície terrestre usando treze bandas espectrais, distribuídas nas faixas do visível, do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Bandas estas também utilizadas neste presente trabalho e que, a partir de estudos dos autores citados mostrou-se eficaz no que tange o universo de análises temporais detalhadas da superfície, detectando variações no solo e evidenciando a dinâmica agrícola.

Quanto ao espectro eletromagnético, Lillesand, Kiefer e Chapman (1980) discorrem sobre sua aplicação:

O espectro eletromagnético é a faixa de todos os tipos de radiação eletromagnética, que varia de ondas de rádio a raios gama, englobando a luz visível e a radiação infravermelha como componentes importantes para aplicações de sensoriamento remoto.

Observa-se que a análise multi-espectral é utilizada nos estudos de SILVEIRA (2018) com o objetivo de mapear as fitofisionomias da Caatinga e, segundo ele, as “classificações com dados multi-temporais são superiores às que utilizam apenas dados monotemporais”. Assim, a utilização de dados provenientes de diferentes períodos da cultura possibilita a identificação de variações sazonais e funcionais das comunidades vegetais, refletindo mais fielmente a dinâmica agrícola do ambiente estudado.

Como destacado, "as bandas do vermelho, do NIR e do SWIR, podem ser bastante interessantes, uma vez que estas bandas são capazes de indicar variações na estrutura da vegetação e na quantidade de vegetação não fotossinteticamente ativa" (Roberts et al., 1993; Delegido et al., 2015). Portanto, a utilização dessas bandas no sensoriamento remoto é fundamental para a análise detalhada das características da vegetação. As variações detectadas nessas faixas espectrais fornecem insights valiosos sobre a saúde e a dinâmica das comunidades vegetais, mostrando-se eficaz em identificar não apenas a vegetação ativa, mas também a vegetação não fotossinteticamente ativa, é crucial para entender a biodiversidade e a estrutura ecológica do ambiente.

A faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) é utilizada para extrair informações sobre o conteúdo hídrico das folhas, sendo uma ferramenta eficaz para identificar estresse hídrico e monitorar as variações de umidade da vegetação (Ponzoni & Shimabukuro, 2009). O SWIR, combinado com técnicas como o NDVI, permite um monitoramento mais preciso da biomassa, vigor e estresse das culturas (Jensen, 2009).

Ademais, a interação entre a vegetação e diferentes faixas do espectro eletromagnético mostra-se essencial para a interpretação ambiental, como salientado por Ponzoni e Shimabukuro (2009). As plantas absorvem radiação nas faixas azul e vermelha, refletindo na faixa verde, o que lhes confere a cor que as caracteriza. A clorofila tem um papel central nesse processo, atuando na fotossíntese e convertendo energia luminosa em energia química. Além disso, pigmentos como os carotenoides contribuem para a captação da radiação e proteção contra excesso de luz, evitando danos às plantas (Jensen, 2009).

Ainda com base em Silveira, o autor cita que “os índices de vegetação, por resultarem em classificações semelhantes aos dados de reflectância, podem substituir estes últimos com menor volume de dados”, portanto, ao empregar índices como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), é possível obter informações essenciais sobre a saúde e o vigor das culturas de forma mais eficiente, reduzindo a necessidade de grandes volumes de dados. O autor conclui que,

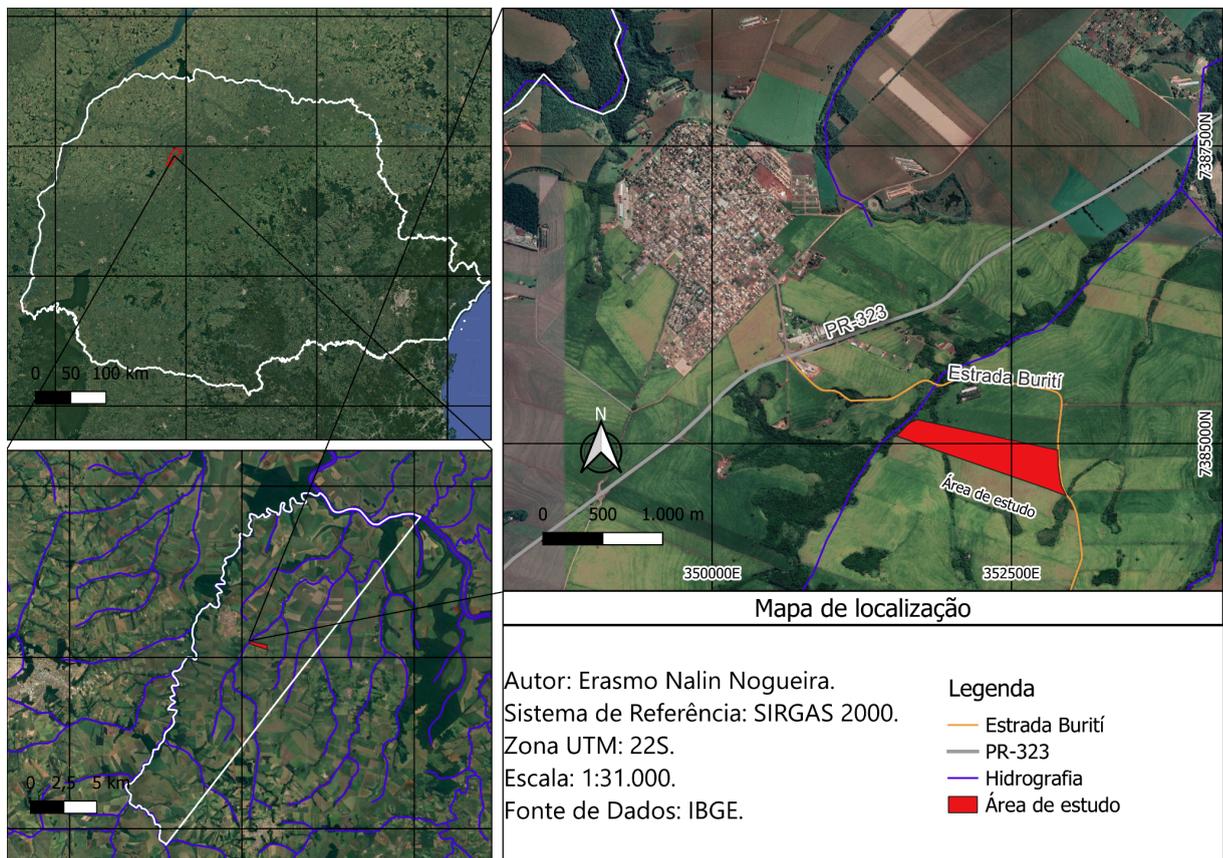
[...] dentre as estratégias de classificação testadas com imagens do MSI/Sentinel-2, é possível concluir que há uma clara vantagem da abordagem multi-temporal em detrimento da mono-temporal, independente do período de aquisição das imagens (chuvoso ou seco).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada no município de Jussara, estado do Paraná, próxima ao Rio Cananéia. A propriedade apresenta uma configuração geográfica representativa da mesorregião Norte Central Paranaense, caracterizada por um relevo suave a ondulado, com presença de áreas de planície aluvial ao longo dos córregos que cortam a região. As dimensões da propriedade totalizam cerca de 33 ha, com a presença de vegetação remanescente de Mata Atlântica.

Figura 1 - Mapa de Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

A área de estudo do presente trabalho está inserida no terceiro planalto paranaense, que corresponde a uma das grandes unidades geomorfológicas do estado. Essa região se destaca pela predominância de formações geológicas pertencentes ao grupo Serra Geral, caracterizado por extensos derrames de lava

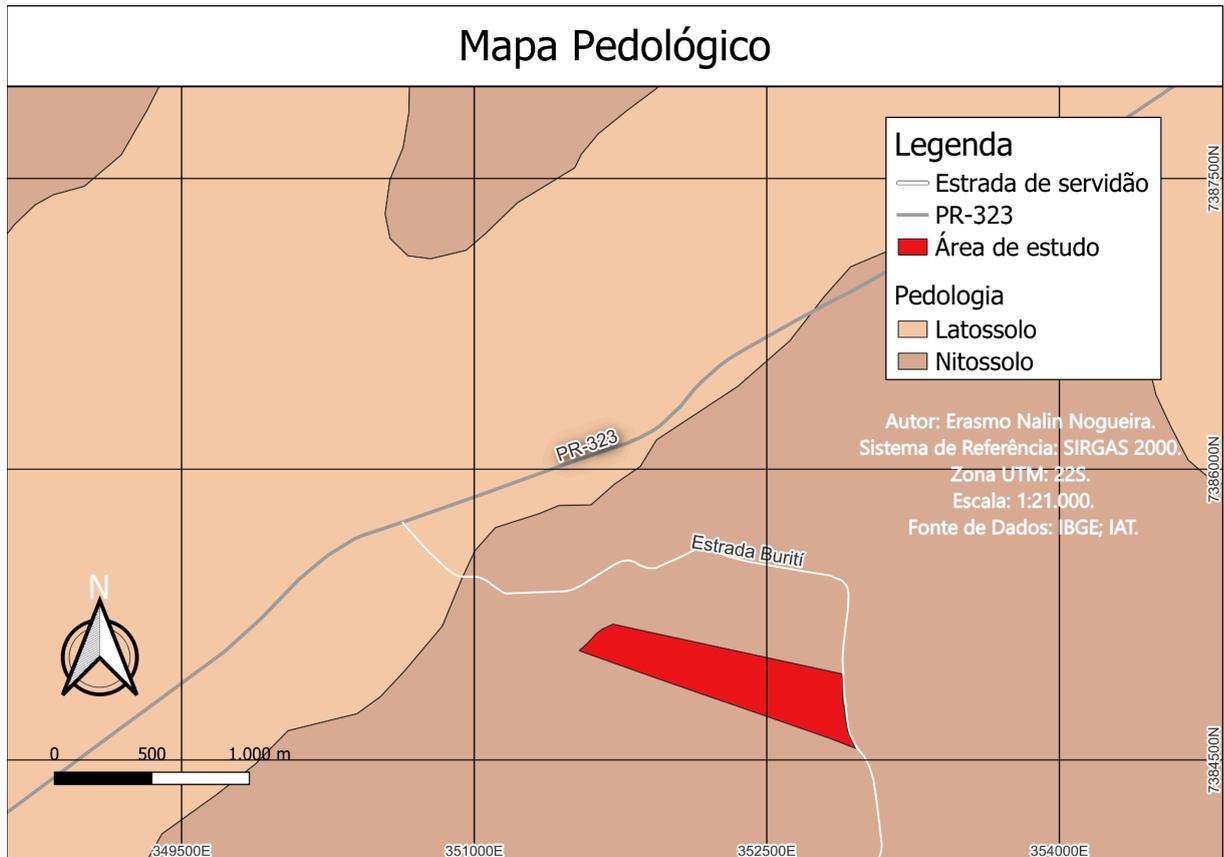
basáltica, resultado de intensas atividades vulcânicas que ocorreram durante o período Cretáceo, há cerca de 130 a 135 milhões de anos (Milani et al., 2007).

O Grupo Serra Geral, reflete a complexidade geológica da área, onde os derrames basálticos formam solos de elevada fertilidade natural, como o Latossolo Vermelho, que é amplamente encontrado na região (Ross, 1990). Este tipo de solo é conhecido por sua alta fertilidade natural, mas também por sua suscetibilidade à erosão, especialmente em áreas de manejo inadequado.

A vegetação da área de estudo é constituída predominantemente por espécies nativas da Floresta Estacional Semidecidual, que é típica da região Sul do Brasil. Esses remanescentes florestais desempenham um papel essencial na preservação da biodiversidade e na manutenção da qualidade dos recursos hídricos locais, como destaca Lepsch (2011) em seus estudos sobre solos e manejo sustentável. Além disso, a proximidade com o Rio Cananéia proporciona uma fonte constante de água para a agricultura e a pecuária, sendo um elemento crucial para a sustentabilidade das atividades produtivas na área.

Os solos da região apresentam boa capacidade para atividades agrícolas, mas exigem um manejo cuidadoso, principalmente devido à textura argilosa e à sensibilidade à compactação, o que pode afetar a infiltração de água e a drenagem. Esses fatores são particularmente importantes em sistemas agrícolas de culturas temporárias, que demandam monitoramento constante das condições edafoclimáticas para garantir alta produtividade e uso eficiente dos insumos.

Figura 2 - Mapa pedológico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O clima da área de estudo, insere-se na classificação climática Cfa, conforme Köppen, sendo caracterizado como subtropical úmido com verões quentes e invernos moderados, sem estação seca definida. A média de precipitação anual varia entre 1.500 e 1.800 mm, com uma distribuição relativamente uniforme ao longo do ano, porém concentrando-se mais nos meses de verão, o que favorece o desenvolvimento de culturas temporárias como soja, milho e trigo.

Durante o verão, as temperaturas podem alcançar valores superiores a 30°C, enquanto no inverno, a média mínima gira em torno de 12°C, com eventos ocasionais de geadas. Esse regime térmico influencia diretamente o ciclo de crescimento das culturas, determinando o calendário agrícola da região. Estudos como os de Monteiro (1973) e Carvalho et al. (2016) reforçam que a interação entre temperatura e precipitação é determinante para a escolha das práticas agrícolas e das variedades de cultivos mais adequadas para a região.

A variabilidade climática, especialmente a ocorrência de eventos extremos como chuvas intensas e secas prolongadas, é uma preocupação crescente no

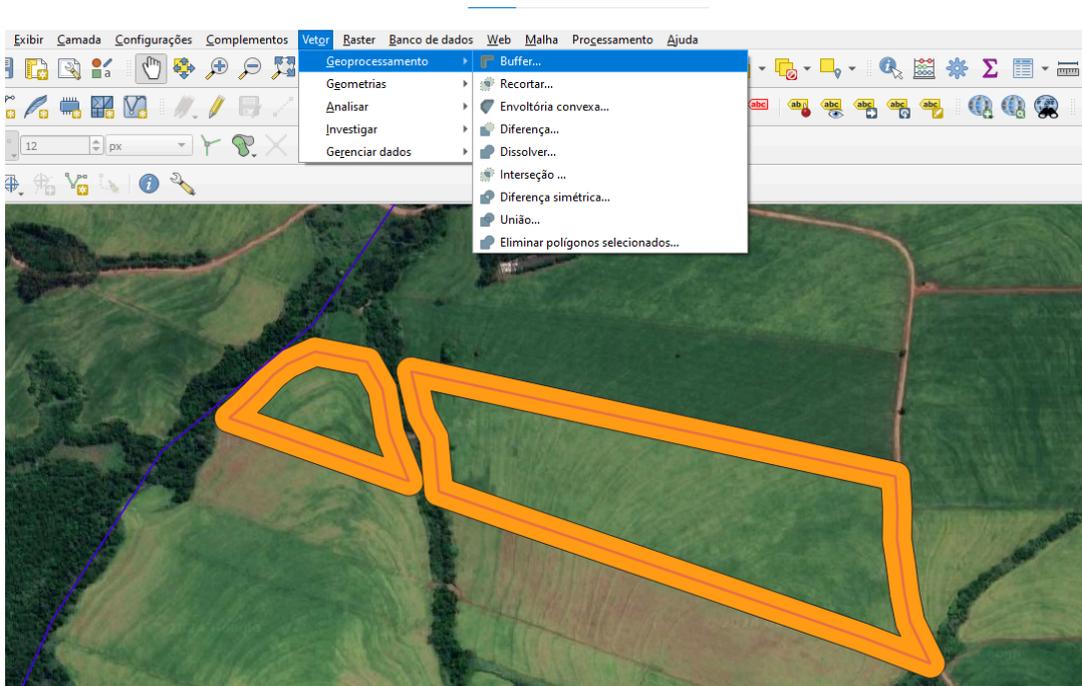
manejo agrícola da região. Essas flutuações impactam diretamente a disponibilidade hídrica e a produtividade agrícola, sendo, por isso, o monitoramento climático essencial para mitigar riscos e melhorar a eficiência no uso da terra. A proximidade da propriedade com o Rio Cananéia também desempenha um papel crucial na dinâmica hídrica local, oferecendo suporte para a irrigação em períodos de déficit hídrico, o que contribui para a resiliência da produção agrícola.

A área de estudo compreende a propriedade como um todo, com ênfase nas parcelas destinadas ao plantio de culturas temporárias, como soja e milho. Para garantir maior precisão, a extração dos dados espectrais no GEE foi realizada considerando exclusivamente as áreas efetivamente utilizadas para o plantio, delimitadas com base em ferramentas de geoprocessamento que permitiram identificar e mapear as zonas cultivadas dentro da propriedade.

A princípio foi gerado um buffer de 30 metros em torno da linha que delimita a propriedade, tanto em sua face interna, quanto externa (Figura 3), para uma distribuição equilibrada. Também foi excluído do polígono a área de APP da propriedade, a fim de manter somente as áreas de cultivo agrícola.

Esse procedimento visa evitar a mistura de dados espectrais de áreas adjacentes que não estão na zona de estudo, reduzindo o risco de interpretações equivocadas dos dados.

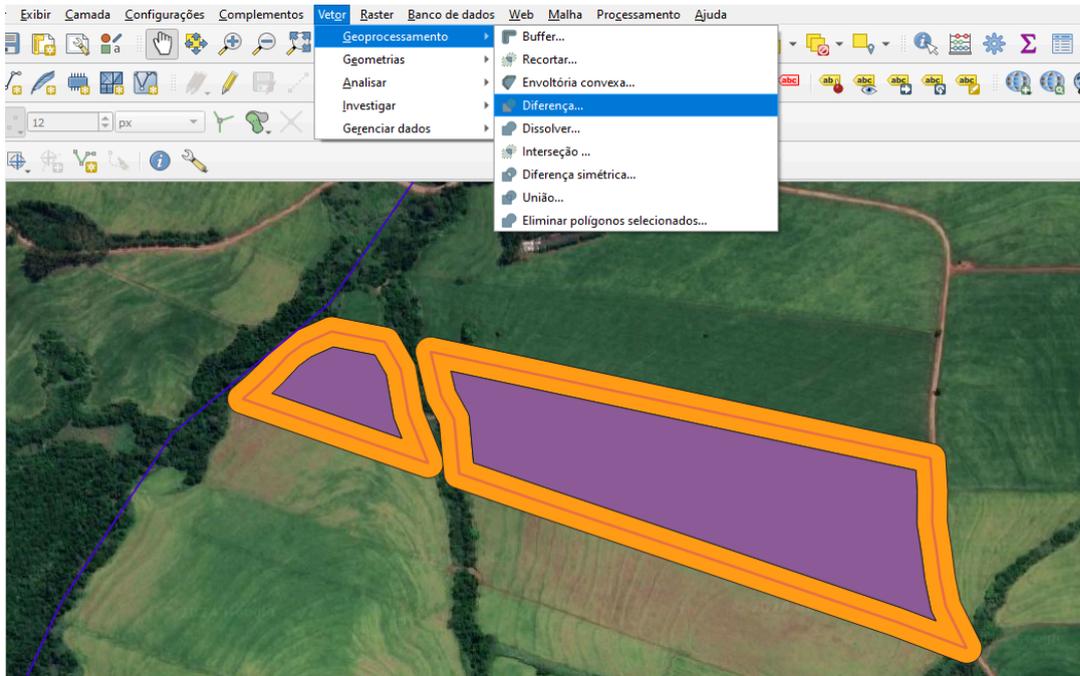
Figura 3: Buffer do polígono convertido em linha (área interna e externa).



Fonte: Qgis.

De posse do shapefile do buffer, realizou-se uma operação de diferença (Figura 4), permitindo a delimitação precisa da área de interesse.

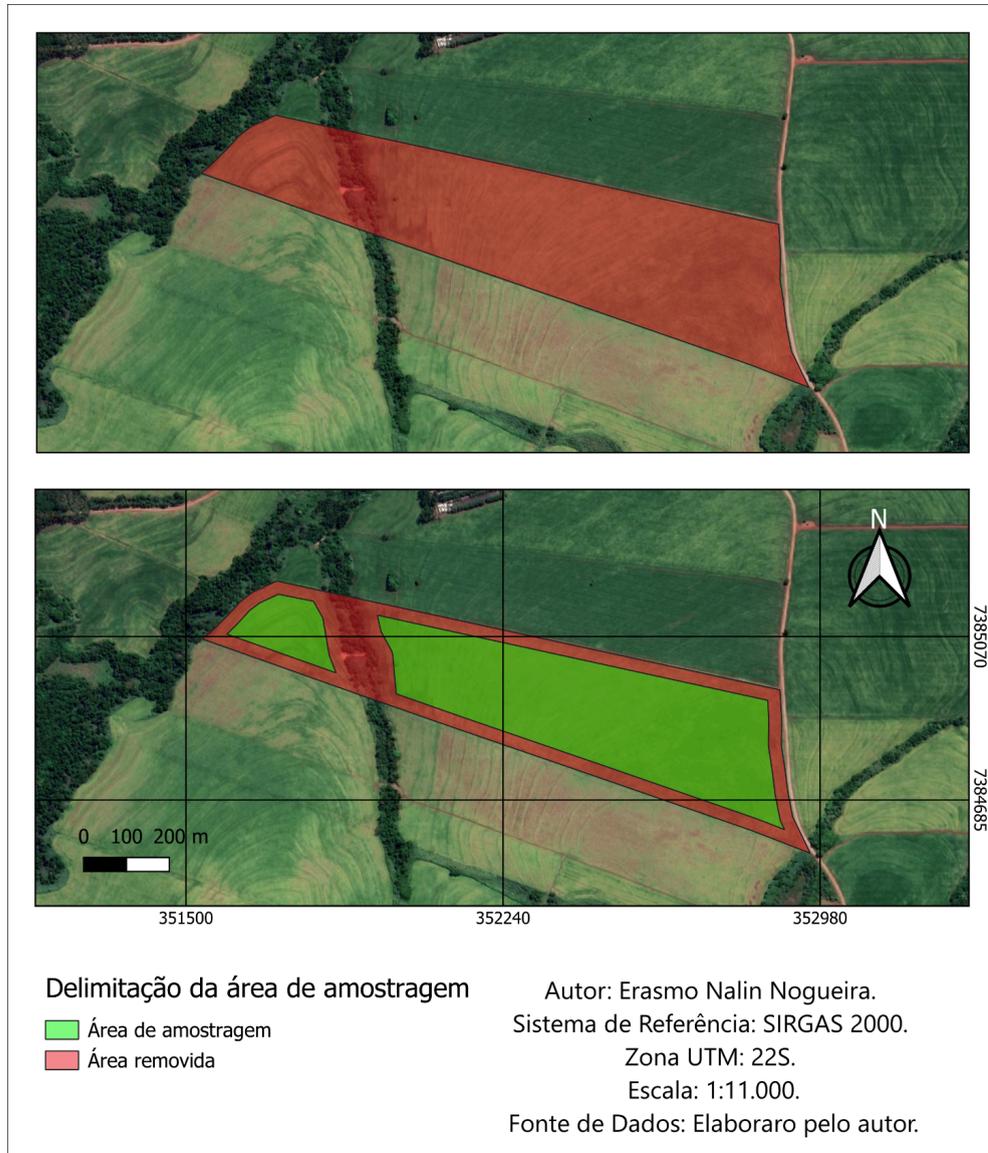
Figura 4 - Ferramenta de diferença.



Fonte: Qgis.

As áreas em laranja correspondem ao buffer aplicado ao redor dos limites das áreas agrícolas, enquanto as regiões em roxo representam as porções efetivamente cultivadas da propriedade, com a exclusão das margens para evitar a interferência espectral das bordas, garantindo uma análise mais precisa da produtividade nas áreas de plantio. Dessa forma, obteve-se uma área de estudo refinada e pronta para as etapas subsequentes de modelagem e análise espectral, conforme figura 5.

Figura 5 - Delimitação da área de amostragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, os dados de reflectância obtidos na plataforma GEE foram gerados a partir do polígono já tratado utilizando das técnicas de geoprocessamento descritas anteriormente.

### 3.2 BASES DE DADOS

Os dados para este estudo acadêmico foram obtidos a partir de registros de produção fornecidos pela cooperativa responsável pelo armazenamento e

comercialização de grãos. Nesta fase, os dados podem ser classificados como "brutos", pois não foram submetidos a análises destinadas à modelagem. Estes dados servem como alicerce para o presente estudo e também para os dados posteriormente modelados pelo GEE, referentes às imagens de satélite.

Esses dados auxiliam na análise dos modelos espectrais e visam pela consistência das estimativas de produtividade em comparação com os registros empíricos da propriedade em análise.

Na tabela 1, estão explícitos os dados coletados referentes à produção total da área de estudo.

Tabela 1 - Produção em KG's.

<b>Produto</b>	<b>Ano</b>	<b>Total (kg)</b>
SOJA	2020	114.089
	2021	113.798
	2022	12.018
	2023	156.932
	2024	120.276
MILHO	2019	255.626
	2020	200.348
	2021	133.758
	2022	140.912
	2023	148.563

Fonte: Cooperativa Cocamar, unidade de Jussara - PR.

Durante a segunda etapa do estudo, foram adquiridas imagens de satélite do Sentinel-2, que é equipado com o sensor MSI (Multispectral Instrument). Essas imagens abrangem o intervalo temporal de dezembro de 2018 a maio de 2024 e estão disponíveis na plataforma Google Earth Engine (GEE).

O sensor MSI apresenta uma resolução espacial que varia de 10 a 60 metros, dependendo da banda espectral, e é capaz de capturar 13 bandas espectrais. Essa abrangência nos permite ter uma visão detalhada da superfície terrestre e dos

processos vegetativos. Para este estudo, foram utilizadas as bandas vermelho, infravermelho próximo e SWIR, que possuem uma resolução espacial que varia de 10 a 20 metros, conforme apresenta a tabela a seguir:

Tabela 2 - Características das Bandas Espectrais Utilizadas no Estudo.

Nome da banda	Número da banda	Resolução espacial	Faixa espectral (nm)
Vermelho	Banda 4	10m	650 - 680
Infravermelho próximo (NIR)	Banda 8	10m	770 - 880
SWIR (ondas curtas)	Banda 11	20m	1560 - 1660

Fonte: Elaborado pelo autor.

Primeiramente, as imagens foram processadas por meio de um filtro de nuvens, com o intuito de reduzir a influência de áreas nubladas e, assim, garantir a qualidade e a precisão dos dados espectrais. Este processo é necessário para eliminar interferências atmosféricas que possam comprometer a precisão das análises, assegurando que as informações refletidas na superfície correspondam, de fato, às condições reais da área de estudo. Além disso, foi realizada uma análise manual dos dados, que teve como objetivo identificar e remover contaminações residuais, garantindo assim, uma análise ainda mais precisa, mesmo após a aplicação do filtro de nuvens.

A tabela abaixo apresenta a quantidade de imagens utilizadas para cada mês e ano do período estudado, refletindo o volume de dados disponível para a análise.

Tabela 3: Volume de Imagens por Mês e Ano de Estudo.

Mês	Ano						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Janeiro	-	6	8	3	8	5	9
Fevereiro	-	5	6	9	8	6	8
Março	-	7	11	12	6	8	8
Abril	-	5	9	9	8	7	7
Maio	-	5	6	8	7	8	8
Junho	-	9	5	4	9	8	1
Julho	-	8	9	10	11	9	-
Agosto	-	12	8	10	7	7	-
Setembro	-	6	11	6	5	5	-
Outubro	-	7	10	4	8	6	-
Novembro	-	9	6	7	7	3	-
Dezembro	5	5	5	10	5	8	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a aplicação do filtro de nuvens, as imagens foram submetidas a um processo de modelagem na plataforma GEE, visando realizar uma análise abrangente dos dados espectrais. Durante essa fase, as imagens foram processadas utilizando um código pré-escrito, que capturou variações de reflectância, indicando tanto o comportamento da vegetação quanto a condição do solo ao longo do tempo. O código utilizado para a obtenção do produto está anexado ao final deste trabalho.

Foi gerado um produto em planilha contendo as médias de reflectância por banda espectral, calculadas a partir da área cultivada (pixels) em cada data do período estudado sem incidência de nuvens.

Além disso, foram calculados dois índices de vegetação, o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e o NDWI (Índice de Água da Diferença Normalizada), para análises adicionais. No caso do NDVI, Ponzoni e Shimabukuro (2009) explicam que o índice é "derivado da relação entre a reflectância no vermelho e no infravermelho próximo", permitindo "áreas diferenciadas com alta densidade

vegetativa de áreas degradadas ou não vegetadas" (Ponzoni & Shimabukuro, 2009, p. 93). Nesse índice, valores próximos a 1 indicam melhores condições da vegetação, enquanto valores próximos a 0 indicam piores condições.

Para fins didáticos, é apresentado sua respectiva fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - VERMELHO}{NIR + VERMELHO}$$

**NIR:** Infravermelho próximo

**VERMELHO:** Reflectância no vermelho

O NDWI, por sua vez, é descrito como particularmente útil para identificar "níveis de umidade no clima", utilizando a reflectância nas bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Os autores observaram que esse índice é "altamente sensível às condições hídricas das plantas", sendo crucial para "monitorar o estresse hídrico e as condições de seca" (Ponzoni & Shimabukuro, 2009, p. 115). Este índice destaca áreas com maior teor de água, onde valores mais altos (próximos a 1) indicam uma maior presença de umidade, geralmente associada a uma vegetação mais saudável ou a solos com boa disponibilidade hídrica. Por outro lado, valores baixos (próximos a -1) sugerem menor conteúdo de água, o que pode ser indicativo de estresse hídrico na vegetação ou de solos secos.

Fórmula do NDWI:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

**NIR:** Infravermelho próximo

**SWIR:** Infravermelho de ondas curtas

Na etapa de resultados, foram extraídas as médias dos índices espectrais para os períodos correspondentes aos picos identificados nos gráficos de dispersão. Essa abordagem foi adotada para garantir que os valores analisados representassem, de forma mais precisa, os momentos de maior vigor vegetativo e disponibilidade hídrica, conforme indicados pelos índices NDVI e NDWI.

Os períodos de pico foram delimitados com base em uma análise visual detalhada dos gráficos, identificando intervalos em que os valores dos índices apresentaram máximos consistentes para as culturas de soja e milho. Em seguida, as médias dos valores espectrais dentro desses intervalos foram calculadas, representando uma média espacial da área de estudo para cada data analisada. Essa metodologia isola os momentos de maior relevância no ciclo das culturas, possibilitando uma análise mais direcionada da relação entre os índices espectrais e as médias de produção real registradas no período estudado.

Além disso, para complementar a análise e ilustrar visualmente a relação entre os índices espectrais e os dados de produção agrícola, foram elaborados gráficos de dispersão e neles foram inseridas barras que delimitam seus topos.

#### **4. RESULTADOS**

Nessa seção, os gráficos de reflexão das três bandas selecionadas são discutidos, assim como os índices de integração dessas bandas, os quais permitem uma análise detalhada da superfície na área de estudo.

O primeiro gráfico analisado (Gráfico 1) refere-se à reflectância da banda do infravermelho próximo (NIR). Essa banda possui capacidade de avaliar características estruturais da vegetação, e nos fornece informações sobre a densidade de biomassa e o vigor das plantas. O comportamento de reflexão no NIR está diretamente associado à estrutura celular das folhas, o que torna essa banda essencial para o monitoramento do estado fisiológico das culturas.

Os valores registrados no gráfico apresentam oscilações significativas que refletem a dinâmica agrícola local. Nos momentos em que os valores de reflectância se aproximam de 0, é possível inferir condições como:

- ❖ Períodos de colheita, em que há redução da cobertura vegetal na área;
- ❖ Seca ou déficit hídrico, comprometendo o desenvolvimento das culturas;
- ❖ Estresse hídrico, causado por fatores climáticos adversos ou manejo inadequado;
- ❖ Solo exposto, típico de períodos de preparo para o plantio ou ausência de cobertura vegetal.

Os valores intermediários de reflectância, geralmente variando entre 0,1 e 0,4, indicam uma transição entre os períodos de biomassa mínima e os momentos

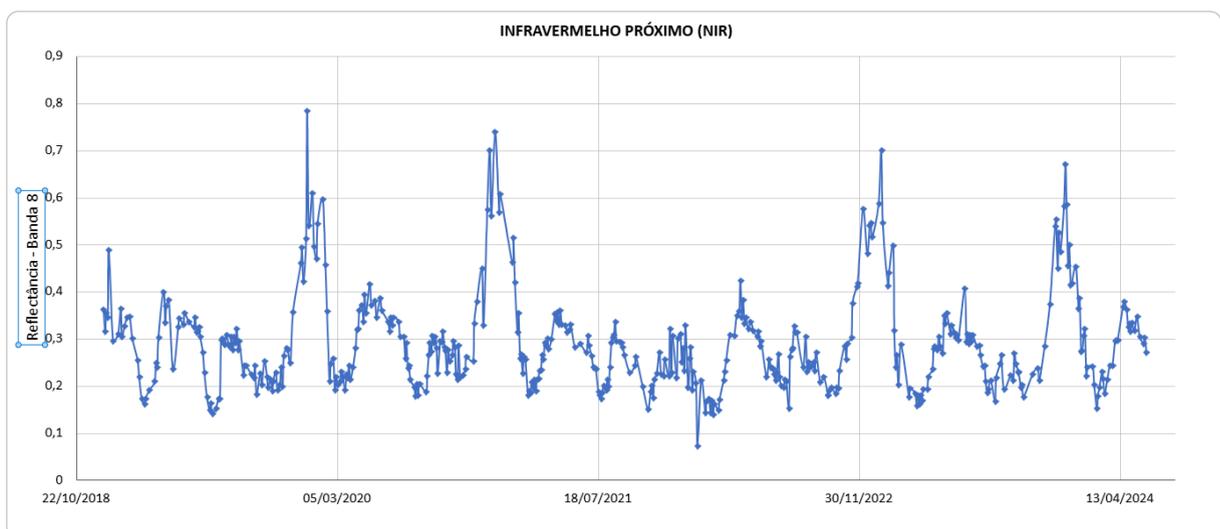
de desenvolvimento vegetativo máximo. Esses valores estão associados às fases iniciais do ciclo agrícola, incluindo:

- ❖ **Plantio e germinação:** Nesse estágio, as culturas começam a se estabelecer, mas a cobertura vegetal ainda não é densa o suficiente para refletir valores elevados de NIR.
- ❖ **Desenvolvimento inicial:** À medida que as plantas crescem e formam o dossel vegetal, os valores de reflectância aumentam progressivamente. No entanto, as variações climáticas ou as condições de manejo podem influenciar a taxa de crescimento, gerando pequenas oscilações nessa faixa.

Em contrapartida, os picos de reflectância, com valores próximos de 1, indicam momentos de maior densidade de biomassa e vigor das plantas, geralmente correspondendo às fases de crescimento ativo das culturas. Esses períodos são marcados pelo aumento da cobertura foliar, o que resulta em uma maior capacidade de reflexão de radiação na banda do NIR.

A análise do gráfico evidencia também a relação direta entre os padrões de reflectância e o ciclo agrícola da região, abrangendo as etapas de plantio, crescimento vegetativo, colheita e preparo do solo para o reinício de um novo ciclo.

Gráfico 1 - Reflectância na banda do infravermelho próximo (NIR).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando continuidade à análise, é apresentado o gráfico 2, referente à reflexão espectral da banda do vermelho. Essa banda se destaca por sua sensibilidade em captar informações associadas à atividade fotossintética das plantas.

A fotossíntese das plantas está diretamente relacionada à absorção de energia luminosa, especialmente na faixa do vermelho, pela clorofila. Durante esse processo, a planta converte energia solar em energia química, utilizada na produção de carboidratos que sustentam seu crescimento e desenvolvimento. Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2009), essa forte absorção da banda do vermelho pela clorofila torna-a um parâmetro essencial para avaliar a atividade fotossintética das plantas e sua condição fisiológica.

Uma característica marcante da banda do vermelho é a exibição de valores elevados de reflectância em superfícies com baixa densidade de biomassa, como áreas de solo exposto ou vegetação em processo de declínio. Por outro lado, em regiões cobertas por vegetação densa e ativa, os valores de reflectância são reduzidos, devido à elevada absorção da radiação pela clorofila.

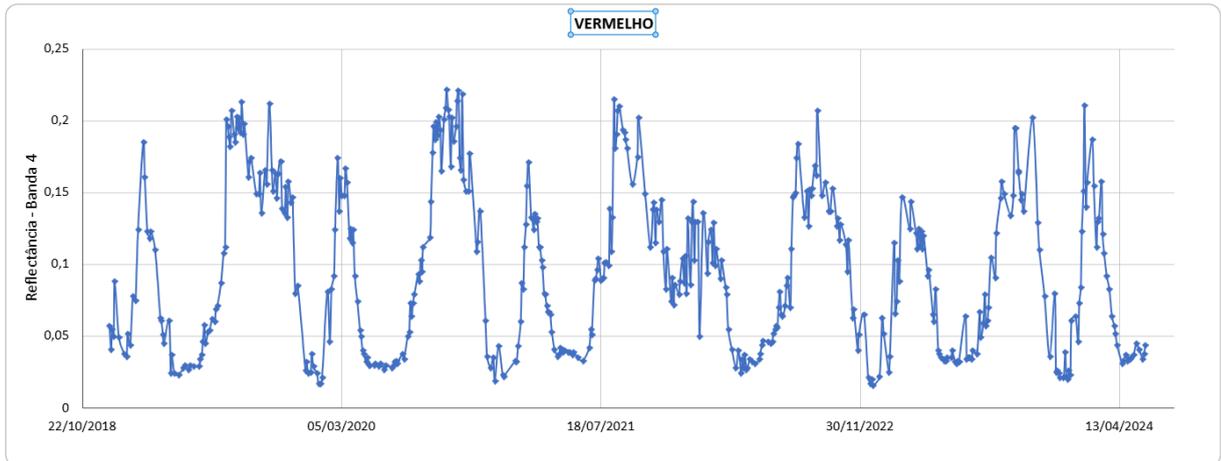
Os períodos com valores próximos a 0,05 indicam uma maior cobertura vegetal com alta atividade fotossintética. Deste modo, os períodos com maior predominância destes valores coincidem geralmente com:

- ❖ Fases de crescimento pleno, quando o dossel vegetal está mais desenvolvido e cobre significativamente o solo.
- ❖ Clima favorável, com disponibilidade adequada de água e nutrientes, contribuindo para a maximização da fotossíntese e densidade da vegetação.

Os picos nos gráficos, com valores variando entre 0,15 e 0,25 , indicam a ausência ou redução significativa da fotossíntese da cultura ativa, e podem estar associados a:

- ❖ Períodos de colheita, quando a biomassa verde é removida, expondo o solo e refletindo mais intensamente.
- ❖ Condições de estresse hídrico ou seco, onde a vegetação apresenta queda na atividade fotossintética, aumentando a reflectância nesta faixa.

Gráfico 2 - Reflectância na banda do vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Prosseguindo, partimos para a análise do terceiro gráfico de reflectância, referente à banda espectral do SWIR (infravermelho de ondas curtas). Esta banda desempenha um papel crucial na avaliação das condições da vegetação e da superfície terrestre, pois é sensível às variações no teor de umidade, tanto nas plantas quanto no solo.

Como demonstrado no gráfico 3, os valores de reflectância do SWIR apresentam flutuações ao longo do tempo, refletindo alterações sazonais e condições ambientais específicas. De modo geral, níveis mais altos de reflectância estão associados a áreas de vegetação senescente ou apenas expostas, uma vez que a absorção de radiação é reduzida quando há menor disponibilidade de água em tecidos vegetais. Por outro lado, os valores mais baixos indicam maior retenção de água, típica de vegetação saudável e em pleno desenvolvimento fisiológico, o que é particularmente relevante para o monitoramento agrícola.

Os períodos de valores baixos no gráfico, situados abaixo de 0,15, refletem superfícies específicas por maior umidade. Esses momentos geralmente coincidem com:

- ❖ Estágios de desenvolvimento ou maturação das culturas, quando um cultivo saudável possui alto teor de água em seus tecidos.
- ❖ Períodos de clima favorável, com chuvas regulares e alta disponibilidade de água no solo.

Os valores intermediários, variando entre 0,15 e 0,30, sugerem condições de transição na dinâmica agrícola:

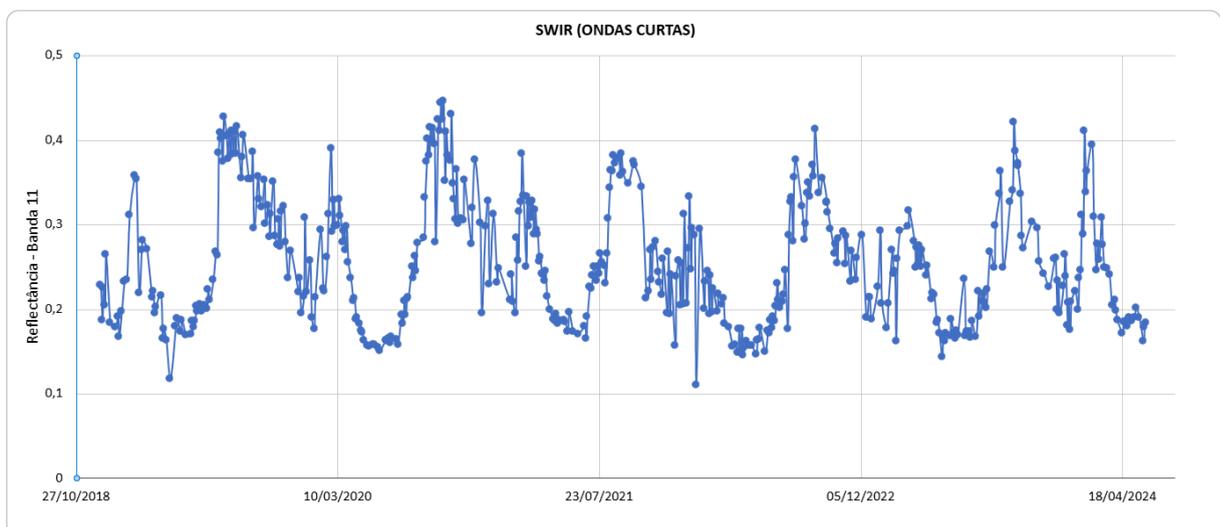
- ❖ Vegetação em fase inicial de crescimento, com uma quantidade moderada de água presente em tecidos vegetais.
- ❖ Áreas parcialmente irrigadas, onde a disponibilidade hídrica é heterogênea.
- ❖ Momentos de colheita parcial, onde o solo começa a se expor gradualmente à medida que a cobertura vegetal é reduzida.

Por outro lado, os picos que alcançam valores superiores a 0,30 representam superfícies mais secas, descritos por:

- ❖ Condições de estresse hídrico, seja por períodos de seca ou insuficiência de chuvas, que protegem o teor de água na vegetação.
- ❖ Solo exposto ou áreas com vegetação seca, como ocorre após uma colheita ou em períodos de transição entre safras.
- ❖ Resíduos orgânicos secos, que refletem mais intensamente nessa banda devido à ausência de umidade significativa.

Nota-se no gráfico que esses picos podem ser observados com maior frequência em períodos de estiagem prolongada, como os ocorridos entre 2020 e 2022.

Gráfico 3 - Reflectância na banda SWIR (ondas curtas).



Fonte: Elaborado pelo autor.

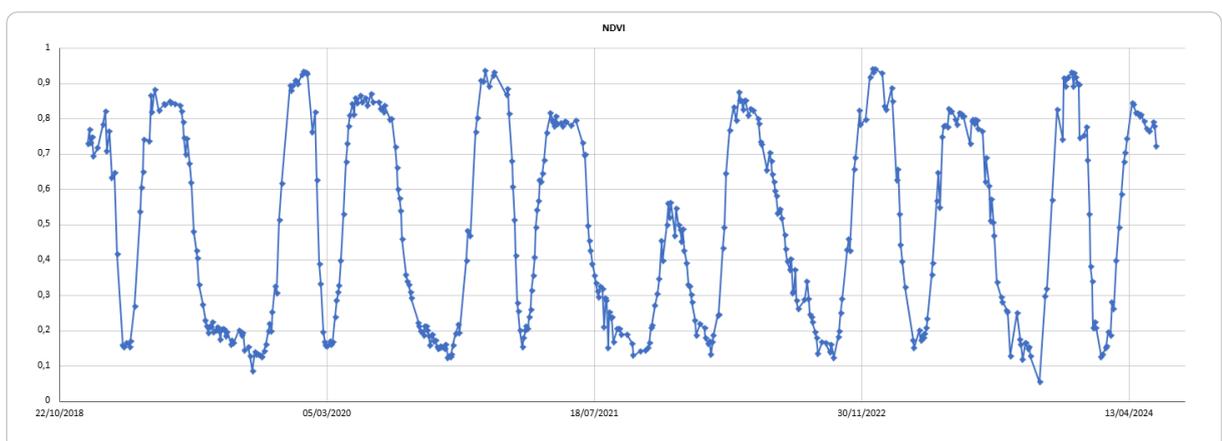
A análise detalhada das bandas espectrais (SWIR, infravermelho próximo e vermelho) proporcionou uma interpretação das condições da superfície ao longo do período avaliado, evidenciando diferentes fases da dinâmica agrícola, bem como interações com fatores ambientais, como teor de umidade do solo, vigor da

vegetação e períodos de estresse hídrico. Essas bandas, demonstradas individualmente, destacaram comportamentos únicos e complementares, como a sensibilidade do SWIR à umidade, a relação do infravermelho próximo com a densidade de biomassa e o reflexo do vermelho em áreas de vegetação menos vigorosa ou exposta.

Embora as análises isoladas forneçam informações valiosas, elas podem ser limitadas em termos de análise cruzada entre variáveis, dificultando a interpretação integrada das dinâmicas agrícolas e ambientais. Nesse sentido, a utilização de índices espectrais torna-se indispensável para sintetizar essas informações em métricas que capturam as relações entre as bandas e oferecem uma visão mais holística da área de estudo.

Nesse contexto, dois índices foram gerados: o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e o NDWI (Índice de Água da Diferença Normalizada). O NDVI, amplamente utilizado em estudos de monitoramento vegetativo, combina as bandas do infravermelho próximo e vermelho para mensurar o vigor e a densidade do cultivo, sendo sensível às mudanças no desenvolvimento das culturas agrícolas. Por outro lado, o NDWI, que utiliza as bandas do infravermelho próximo e do SWIR, é uma métrica fundamental para avaliar a disponibilidade hídrica, destacando-se em contextos de análise de umidade do solo e saúde hídrica da região.

Gráfico 4 - NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresentado acima mostra o comportamento temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Conforme destacado por Shimabukuro e Ponzoni (2019), o NDVI é calculado com base na razão entre a diferença e a soma das bandas espectrais do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (Red), sendo uma das estatísticas mais utilizadas na análise espectral por sua sensibilidade às mudanças na biomassa e na densidade vegetativa.

O NDVI é amplamente utilizado para monitorar a saúde da vegetação, pois reflete a densidade e o vigor da biomassa ao longo do tempo, com valores normalizados variando de -1 a 1.

Os valores máximos apresentados no gráfico, próximos a 1, indicam alta densidade de biomassa e vegetação saudável, características de momentos em que as culturas afetam o auge de seu crescimento. De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2019), valores elevados do NDVI estão diretamente relacionados à alta reflectância no NIR, associada à estrutura celular do crescimento, e à baixa reflectância no vermelho, causada pela absorção da luz pela clorofila durante o processo fotossintético.

Os valores intermediários do NDVI, variando entre 0,3 e 0,6, são indicativos de fases de transição na dinâmica agrícola, como o início do crescimento vegetativo ou períodos de colheita parcial. Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2019), essa faixa de valores reflete superfícies onde há mistura entre vegetação emergente e solo exposto, resultando em uma assinatura espectral combinada.

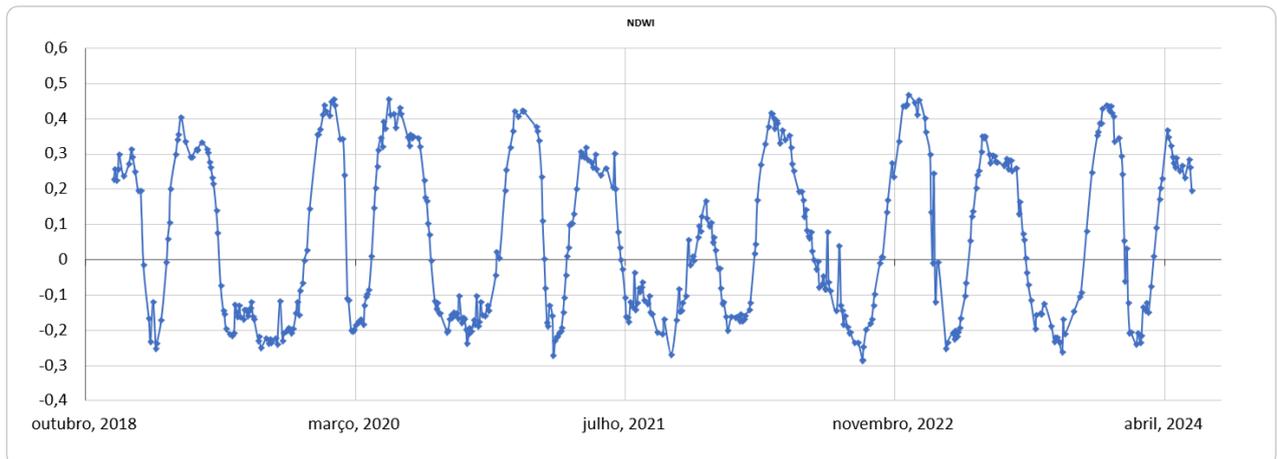
Já os valores baixos, próximos a 0, apontam para períodos de colheita, apenas expostos ou vegetação seca. Shimabukuro e Ponzoni (2019) destacam que essas condições ocorrem devido à ausência de cobertura vegetal ativa, o que reduz significativamente a reflectância no NIR e aumenta a do vermelho. Além disso, períodos de estresse hídrico ou estiagem podem amplificar essas quedas, impactando diretamente a produtividade agrícola.

O gráfico também destaca períodos de quedas acentuadas no NDVI, particularmente entre os anos de 2020 e 2022, que coincidem com eventos de estiagem prolongada na região. Após esses períodos, observa-se uma recuperação nos picos de NDVI, indicando um retorno de condições específicas, como maior disponibilidade hídrica e manejo agrícola adequado.

Diferente do NDVI, que está diretamente relacionado à densidade de biomassa e ao vigor da vegetação por meio da interação entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (Red), o NDWI (Índice de Água por

Diferença Normalizada) concentra-se na avaliação da disponibilidade hídrica, utilizando a combinação do NIR e do SWIR (infravermelho de ondas curtas). Embora o NDVI seja sensível à estrutura celular e à clorofila, o NDWI capta mudanças relacionadas ao teor de água presente na vegetação e no solo.

Gráfico 5 - NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora os dois índices possuam focos diferentes, são complementares, pois, para a compreensão das dinâmicas agrícolas e ambientais, é necessário considerar tanto o vigor vegetativo quanto a disponibilidade hídrica. Por exemplo, enquanto o NDVI pode indicar um vigor elevado da planta, o NDWI pode revelar que tal vigor está sendo suspenso sob condições de déficit hídrico, como em períodos de seca moderada.

#### 4.1. ANÁLISE DOS PICOS DOS ÍNDICES ESPECTRAIS

Para a análise dos índices espectrais, os picos (valores máximos) do NDVI e do NDWI foram identificados a partir de uma inspeção visual dos gráficos ao longo do período testado. Esses picos, delimitados em um intervalo de tempo inicial e final, serão usados como referência para a avaliação das dinâmicas espectrais das culturas de soja e milho, e analisadas paralelamente à média da produção real no período delimitado para que seja averiguada a associação das variáveis.

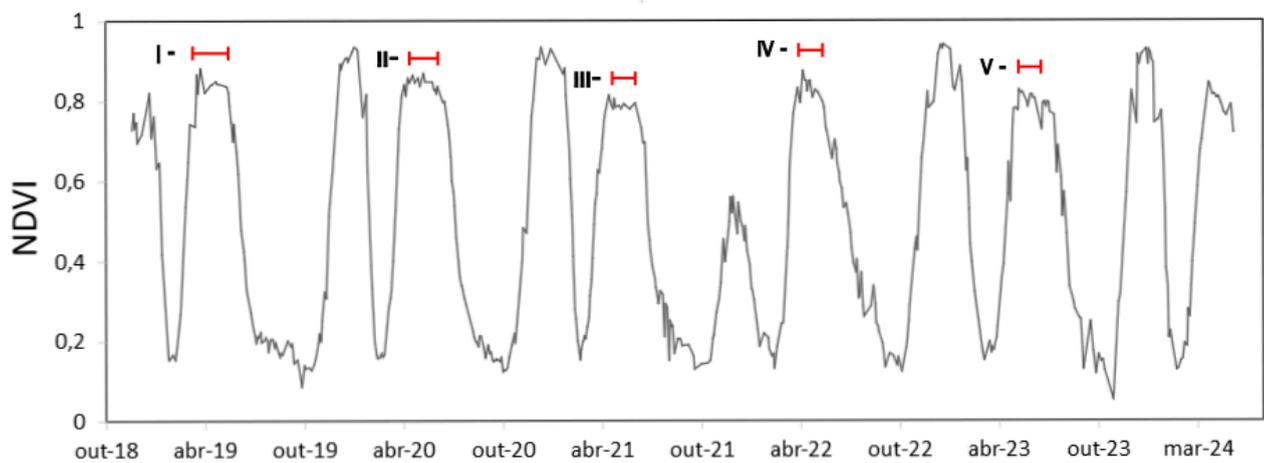
Tabela 3 - Médias dos picos (topos) de NDVI e NDWI durante o ciclo produtivo.

ANO	SOJA		PROD.	MILHO		PROD.
	NDVI	NDWI		NDVI	NDWI	
2019	-	-	-	0,841	0,326	170417
2020	0,910	0,415	76059	0,843	0,381	133565
2021	0,908	0,401	75865	0,787	0,275	89172
2022	0,511	0,102	8012	0,831	0,376	93941
2023	0,899	0,435	104621	0,793	0,289	99042
2024	0,909	0,410	80184	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.2. NDVI

Gráfico 6 - Intervalos de picos para a cultura de milho (NDVI).



Fonte: Elaborado pelo autor.

- ❖ **Intervalo I:**  
13/04/2019 - 05/06/2019
- ❖ **Intervalo II:**  
30/04/2020 - 21/06/2020
- ❖ **Intervalo III:**

05/05/2021 - 14/06/2021

❖ **Intervalo IV:**

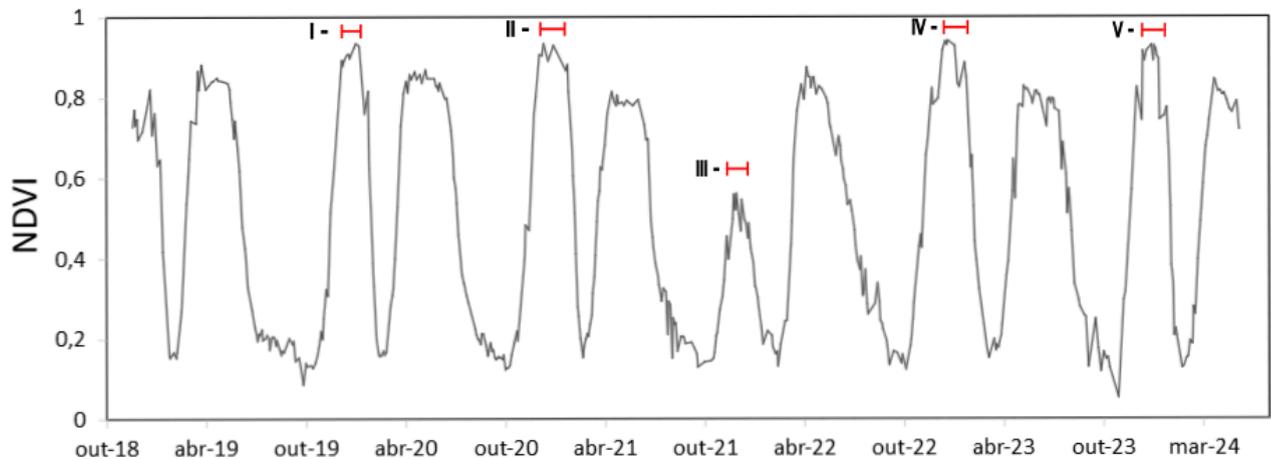
10/04/2022 - 20/05/2022

❖ **Intervalo V:**

10/05/2023 - 14/07/2023

O índice analisado demonstra um padrão consistente entre os valores máximos registrados, apresentando baixa oscilação ao longo do período avaliado. Quando comparados às médias de produção agrícola, conforme evidenciado na Tabela 3, observa-se linearidade entre os dados, reforçando a estabilidade dos resultados obtidos. Esse comportamento indica que, até o presente momento, a metodologia empregada na análise dos índices mostrou-se eficaz, permitindo a identificação precisa das condições espectrais relacionadas à produtividade agrícola.

Gráfico 7 - Intervalos de picos para a cultura da soja (NDVI).



Fonte: Elaborado pelo autor.

❖ **Intervalo I:**

29/12/2019 - 28/01/2020

❖ **Intervalo II:**

23/12/2020 - 04/02/2021

❖ **Intervalo III:**

03/12/2021 - 28/12/2021

❖ **Intervalo IV:**

16/12/2022 - 25/01/2023

❖ **Intervalo V:**

13/12/2023 - 10/01/2024

O índice espectral apresentou eficácia elevada na análise da cultura da soja, especialmente ao identificar uma quebra abrupta de safra no intervalo III, compreendido entre 12/02/2021 e 28/12/2021. Quando comparado às médias de produção para o mesmo período, o índice mostrou-se consistente na detecção de anomalias, reforçando sua sensibilidade às mudanças nos padrões espectrais associados à produtividade agrícola.

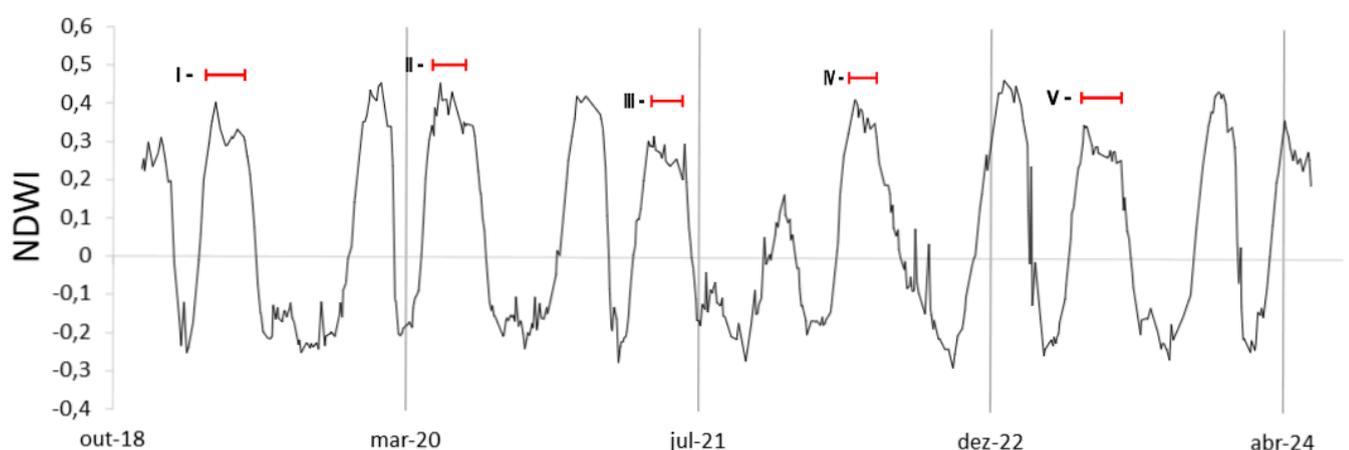
A média de produção para o intervalo no ano de 2020 foi de 0,910, valor que se manteve estável em 0,908 no ano de 2021. Contudo, em 2022, observou-se uma redução significativa para 0,511, correspondendo a uma queda absoluta de 0,397 e uma variação negativa de aproximadamente 77,8% em relação ao ano de 2021.

Os intervalos I, II, IV e V apresentaram uma boa linearidade nos índices espectrais, indicando estabilidade ao longo dos períodos analisados. Quando comparados às médias de produção correspondentes, observa-se uma forte correlação entre os valores espectrais e os níveis produtivos registrados.

#### 4.1.3. NDWI

Os intervalos utilizados são os mesmos apresentados acima, tanto para a cultura de milho quanto para soja.

Gráfico 8 - Intervalos de picos para a cultura de milho (NDWI).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados do intervalo I mostram um NDWI em torno de 0,326, refletindo-se numa produção de 170.417. A estabilidade hídrica desse ano é corroborada pela tabela de médias (tabela 3), apontando para uma sinergia eficaz entre condições de campo e práticas de manejo.

Para o intervalo II, o aumento no NDWI para 0,381, como indicado na tabela 3, é suportado pelos intervalos, que mostram picos consistentes de disponibilidade hídrica. Apesar disso, a produção foi de 133.565 unidades, revelando que fatores limitantes puderam existir, além da água, quando comparadas ao ano interior.

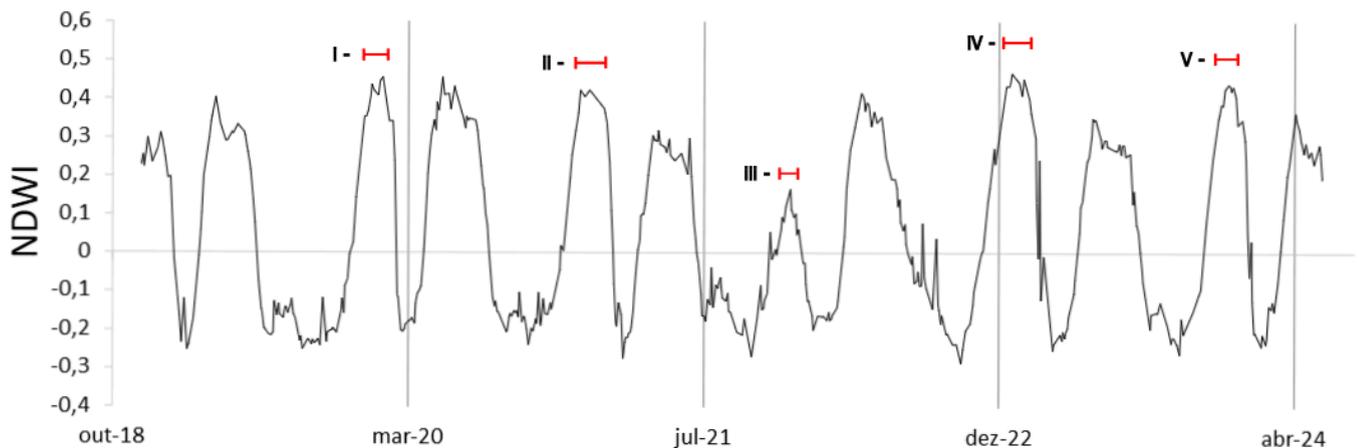
Ambos os intervalos para a cultura de milho apresentam uma certa linearidade, sem grandes oscilações relevantes para se debruçar em análise.

O NDWI menor nos intervalos comparado à média sugere que picos de disponibilidade hídrica podem ter sido subestimados. Isso indica uma possível falha em capturar momentos críticos de alta disponibilidade de água. Os índices dos intervalos mostram menor variabilidade, enquanto a média na tabela 3 aponta para um impacto maior na produção. A modelagem pode não ter captado adequadamente os efeitos do estresse hídrico nas fases críticas de crescimento.

Mesmo com um NDWI menor, em alguns casos a produção supera o ano anterior. Isso sugere que a modelagem falhou em incorporar componentes de manejo e tecnologia que compensassem a menor disponibilidade hídrica.

Observa-se uma clara correlação entre os valores do NDWI e a produção agrícola. Quando o índice estava alto (2020 e 2021), a produção foi robusta. Já em 2022, a queda do NDWI esteve acompanhada por uma drástica redução na produção.

Gráfico 9 - Intervalos de picos para a cultura de soja (NDWI).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos intervalos I e II, o NDWI registrou valores de 0,415 e 0,401, respectivamente. Esses valores são indicativos de adequada retenção de água nas plantas, contribuindo para um desenvolvimento saudável da soja. A estabilidade nos índices sugere que as condições hídricas foram favoráveis.

Já no intervalo III ocorre uma significativa queda no NDWI para 0,102, e o gráfico também apresenta uma redução significativa de sua linha. Esta redução sugere que houve estresse hídrico. A notável discrepância nos valores de NDWI em 2022 está diretamente relacionada à quebra de safra observada. A saúde da planta foi comprometida, reduzindo o rendimento esperado. Esta situação foi agravada por condições climáticas adversas, como temperaturas elevadas ou distribuição irregular das chuvas.

No ano de 2022, tanto o NDWI quanto o NDVI capturaram a mesma tendência de redução nas condições favoráveis para a cultura da soja, indicando um cenário de estresse acentuado que se refletiu em uma quebra de safra. A queda em ambos os índices indica um estresse multifatorial, onde as condições hídricas adversas afetaram não apenas a disponibilidade de água (NDWI) mas também o vigor e a capacidade fotossintética das plantas (NDVI).

A produção caiu drasticamente para 8012 unidades, refletindo diretamente o impacto das condições ambientais adversas capturadas pelos dois índices. Nota-se a importância da sincronização das análises de NDWI e NDVI para entender os desafios enfrentados na lavoura.

Os intervalos IV e V, mantiveram-se estáveis e compatíveis com as médias.

## 4.2. RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

Os gráficos 10 e 11 mostram a relação entre os índices espectrais (NDVI e NDWI) e a produção média das culturas de soja e milho.

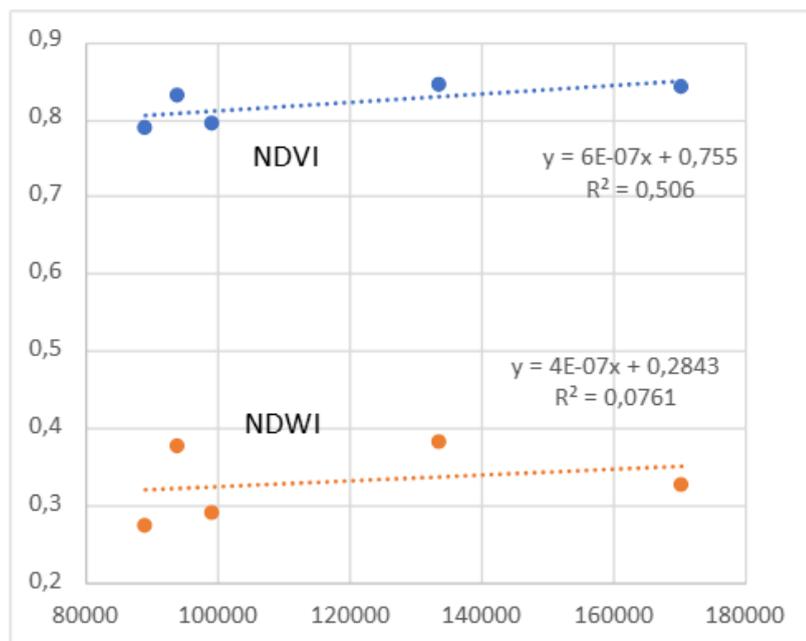
O “R<sup>2</sup>” (coeficiente de determinação) mede a proporção da variabilidade de “Y” (índice espectral) que pode ser explicada pela variabilidade de “X” (produção média). Ele varia de 0 a 1, sendo:

- ( R<sup>2</sup> = 1 ): Ajuste perfeito (todos os pontos estão na linha de tendência).
- ( R<sup>2</sup> = 0 ): Nenhuma relação entre as variáveis.

Neste sentido, quanto maior o R<sup>2</sup>, melhor a linha de tendência explica a relação entre as variáveis.

Para o milho (gráfico 10), o NDVI foi o índice mais robusto, com ( R<sup>2</sup> = 0,506 ), enquanto o NDWI apresentou um ajuste muito baixo ( R<sup>2</sup> = 0,0751).

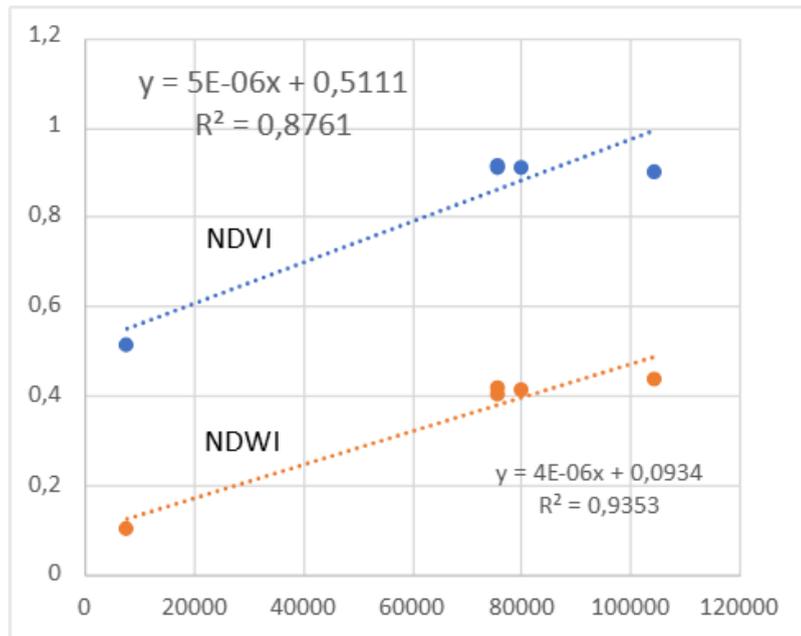
Gráfico 10 - Coeficiente de determinação para a cultura de milho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a soja, tanto o NDVI ( R<sup>2</sup> = 0,9353 ) quanto o NDWI ( R<sup>2</sup> = 0,8761 ) apresentaram bons ajustes, com o NDVI sendo ligeiramente superior.

Gráfico 11 - Coeficiente de determinação para a cultura da soja.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, com base nos valores de  $R^2$ , o NDWI foi mais eficaz em explicar a relação com a produção, especialmente para a soja. Por outro lado, o NDVI apresentou um ajuste moderado para o milho e um ajuste muito baixo para a soja.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, que envolve a análise da produtividade de culturas temporárias em Jussara, PR, utilizando dados espectrais do sensor MSI/Sentinel-2, oferecem insights valiosos para a compreensão do uso de tecnologias de sensoriamento remoto na agricultura, uma subárea fundamental da Geografia Agrária. O sensoriamento remoto, ao permitir a captura de dados em larga escala, possibilita uma análise mais abrangente das interações entre fatores ambientais e práticas agrícolas, refletindo a complexidade das dinâmicas territoriais.

Para uma modelagem mais precisa, é essencial considerar a inclusão de um intervalo temporal maior, contendo uma gama mais vasta de dados da área de estudo que possam afetar a produção. A utilização de informações adicionais, como

dados climáticos, características do solo e práticas de manejo, poderia enriquecer a análise e fornecer um panorama mais detalhado e robusto.

Recomenda-se a realização de estudos futuros que integrem essas variáveis, permitindo uma avaliação mais abrangente e efetiva do potencial das tecnologias de sensoriamento remoto no monitoramento da produtividade agrícola. A inter-relação entre as práticas agrícolas e as características geográficas da região, como relevo, clima e uso do solo, é crucial para o desenvolvimento de estratégias de manejo que considerem as especificidades locais.

Contudo, para os fins propostos, o presente estudo demonstrou que a aplicação de índices espectrais como NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) possui um grande potencial para monitorar e avaliar a produtividade das culturas em condições específicas. A forte correlação do NDVI com a produtividade da soja indica que esse índice pode efetivamente servir como uma ferramenta confiável para o monitoramento da saúde das plantas e a gestão agrícola. Essa análise se insere na Geografia Aplicada, que busca utilizar dados geoespaciais para informar práticas de manejo e conservação, promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos naturais.

A análise mais limitada do NDWI no contexto do milho aponta para a necessidade de uma avaliação crítica na seleção dos índices de sensoriamento remoto a serem utilizados, levando em consideração as características particulares de cada cultura.

A compreensão das interações entre as variáveis ambientais e as práticas agrícolas é essencial para promover a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas produtivos. A análise geográfica, portanto, não se limita apenas à observação dos fenômenos, mas busca entender as relações de causa e efeito que moldam a paisagem agrícola, contribuindo para um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável.

Além disso, a integração de dados de sensoriamento remoto com sistemas de informações geográficas (SIG) pode proporcionar uma visualização mais clara das dinâmicas espaciais, permeando e permitindo chegarmos a conclusão deste presente estudo.

## 6. REFERÊNCIAS

BETTA, M. M. D.; POLISELI, P. C. Mapeamento da soja por meio de técnicas de sensoriamento remoto nos municípios de Lages e Capão Alto - Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, 2023.

CARVALHO, L. G. et al. Clima e Agricultura no Brasil: Perspectivas e Desafios. Brasília: Embrapa, 2016.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São Paulo: Parêntese, 2009.

LEPSCH, I. F. Formação e Conservação dos Solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MILANI, E. J., et al. Bacia do Paraná: Geologia e Recursos Naturais. Petrobrás, 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia: Ambiente e Planejamento. Natal: Periódicos UFRN, 1990.

SANO, E. E. et al. Uso de dados multi-sensores para o monitoramento agrícola no Cerrado: resultados preliminares. In: XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2-5 de abril de 2023, Florianópolis. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: [www.inpe.br](http://www.inpe.br).

SILVEIRA, H. L. F. da. Uso de dados do sensor MSI/Sentinel-2 e de lidar aerotransportado para mapeamento de fitofisionomias de Caatinga e estudo das relações com atributos físico-químicos dos solos. 2018. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

TURNER, W.; LUCIEER, A.; RIDD, M. Remote sensing for biodiversity conservation: an overview and future directions. 2015.

TURNER, W; SPECTOR, S.; GARDINER, N.; FLADELAND, M.; STERLING, E.; STEININGER, M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. Trends in Ecology and Evolution, v. 18, n. 6, p. 306-314, jun. 2003.

## ANEXOS

### ANEXO A - Script de Análise de Dados Espectrais

```

var area = ee.FeatureCollection("users/otaviocmontanher/interior_area_erasmo");

function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

  return image.updateMask(mask).divide(10000);
}

function maskCloudAndShadows(image) {
  var cloudProb = image.select('MSK_CLDPRB');
  var snowProb = image.select('MSK_SNOWPRB');
  var cloud = cloudProb.lt(1);
  var scl = image.select('SCL');
  var shadow = scl.eq(3); // 3 = cloud shadow
  var cirrus = scl.eq(10); // 10 = cirrus
  var mask = (cloud.and(cirrus.neq(1)).and(shadow.neq(1)));
  return image.updateMask(mask);
}

var sentinel = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
  .select('SCL', 'MSK_SNOWPRB', 'MSK_CLDPRB', 'QA60', 'B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B11')
  .filterBounds(area)
  .map(function(image){return image.clip(area)})
  .map(maskCloudAndShadows);

function scale(sentinel){
  return sentinel.divide(10000).clip(area).copyProperties(sentinel, sentinel.propertyNames());
}

var sentinel = sentinel.select('B.*').map(scale);

print(sentinel);

var chart = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: sentinel,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  region: area,
  scale: 20
});

print(chart);

```