

Viabilidade do Uso de Drones no Monitoramento de Cultivos de Soja: Estudo Comparativo em Jataí-GO

Feasibility of Using Drones for Monitoring Soybean Crops: A Comparative Study in Jataí-GO

Carlos Eduardo Damasceno¹ 
Alécio Perini Martins² 

Palavras-chave

Aerofotogrametria
Geotecnologias
MAPIR
Índices de Vegetação

Resumo

Os avanços tecnológicos têm diminuído as barreiras geográficas, demandando uma rápida adaptação de todos os setores, incluindo o uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPA's), conhecidas como drones, que têm sido aplicadas amplamente em áreas como o monitoramento urbano e agrícola. Em municípios como Jataí-GO, onde o agronegócio é predominante, o uso de RPA's para mensuração de índices vegetativos (IV's) traz ganhos para práticas agrícolas mais precisas e sustentáveis. Contudo, o custo de alguns RPA's limita seu uso mais amplo, pois muitos equipamentos chegam a ultrapassar R\$ 160.000. A pesquisa tem caráter experimental e objetivou desenvolver técnicas para o uso de drones de asa rotativa, com valor de mercado mais acessível do que os demais modelos existentes no mercado, na geração de índices de vegetação para o mapeamento e monitoramento de cultivos comerciais de grãos. A metodologia consistiu em: 1) levantamento de campo em áreas de plantio de soja; 2) aquisição de imagens do satélite Sentinel-2 e do drone; 3) processamento das imagens captadas pelo drone Phantom 4 PRO, equipado com uma câmera MAPIR Survey 3W; e 4) análise de correlações entre os IV's obtidos por drone e pelo Sentinel-2 em duas áreas no campus da Universidade Federal de Jataí (UFJ), para validação. A coleta de dados incluiu o uso de GNSS de alta precisão Trimble R4s para georreferenciamento. Os resultados mostram boa correlação entre os IV's calculados com imagens do drone e do Sentinel2 na cultura da soja, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,72 para o VARI e 0,73 para o NDVI. O talhão 001 destacou-se pela uniformidade, obtendo altos coeficientes de determinação, reforçando a eficácia das geotecnologias empregadas. Em áreas mais heterogêneas, como no talhão 002, os IV's revelaram diferenças, especialmente com o índice VARI, que se mostrou menos eficiente para ambientes de cultivo misto. Os dados confirmam que os IV's gerados por drones de custo acessível podem indicar variações de plantio, comprovando a viabilidade de sua aplicação no setor agrícola sem investimentos expressivos.

Keywords

Aerial Photogrammetry
Geotechnologies
MAPIR
Vegetation Indices.

Abstract

Technological advancements have reduced geographical barriers, demanding rapid adaptation across all sectors, including the use of remotely piloted aircraft (RPAs), commonly known as drones, which have been widely applied in areas such as urban and agricultural monitoring. In municipalities like Jataí-GO, where agribusiness is predominant, the use of RPAs for measuring vegetative indices (VIs) brings benefits for more precise and sustainable agricultural practices. However, the cost of some RPAs limits their broader adoption, as many devices can exceed R\$ 160,000 (Brazilian currency). This research is experimental and aimed to develop techniques for using rotary-wing drones, which are more affordable than other models available on the market, to generate vegetation indices for mapping and monitoring commercial grain crops. The methodology consisted of: 1) field surveys in soybean planting areas; 2) acquisition of images from the Sentinel-2 satellite and the drone; 3) processing of images captured by the Phantom 4 PRO drone, equipped with a MAPIR Survey 3W camera; and 4) analysis of correlations between the VIs obtained by the drone and Sentinel-2 in two areas on the campus of the Federal University of Jataí (UFJ), for validation. Data collection included the use of a high-precision Trimble R4s GNSS for georeferencing. The results show a strong correlation between the VIs calculated using drone and Sentinel-2 images for soybean crops, with coefficients of determination (R^2) exceeding 0.72 for VARI and 0.73 for NDVI. Plot 001 stood out for its uniformity, achieving high coefficients of determination, reinforcing the effectiveness of the geotechnologies employed. In more heterogeneous areas, such as plot 002, the VIs revealed differences, particularly with the VARI index, which proved less efficient for mixed cultivation environments. The data confirms that VIs generated by cost-effective drones can indicate planting variations, demonstrating the feasibility of their application in the agricultural sector without significant investments.

INTRODUÇÃO

A rápida evolução das tecnologias, especialmente após a Guerra Fria, tem diminuído as distâncias e exigido adaptações em diversos setores. Nas geotecnologias, essa evolução tem proporcionado ganhos significativos em eficiência e qualidade nos estudos geográficos. Segundo Rosa (2009), as geotecnologias compreendem um conjunto de tecnologias voltadas para a coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica.

Essas tecnologias se destacam no monitoramento de áreas urbanas e agrícolas, sendo utilizadas em práticas como agricultura de precisão, controle de pragas e gestão dos processos de produção e colheita. Esses avanços contribuíram para a popularização da aerofotogrametria, facilitada pelo acesso a imagens de satélite de alta resolução e levantamentos em campo (Matias *et al.* 2015). Dentro dessas tecnologias, os drones têm se destacado como uma das principais ferramentas,

A flexibilidade e versatilidade dos drones têm ampliado as possibilidades de aplicações em estudos geográficos, permitindo a captura de dados de forma eficiente e precisa em diversos contextos ambientais e urbanos. Esses dispositivos oferecem uma nova perspectiva para a coleta de dados espaciais, possibilitando análises detalhadas e atualizadas de áreas de difícil acesso ou de grandes extensões (Alzahrani *et al.*, 2020).

As imagens capturadas por câmeras acopladas a drones permitem a análise das relações entre diferentes bandas espectrais, possibilitando o cálculo de índices de vegetação. Esses índices são fundamentais para avaliar a saúde e o vigor das plantas em uma área específica (Silva Júnior *et al.*, 2018). Na pesquisa, foram testados e utilizados índices como o Índice Resistente à Atmosfera na Região do Visível (VARI), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Área Foliar (IAF), que são recomendados para análises em atividades agropecuárias (Schwalbert *et al.*, 2020; Andrade Júnior *et al.*, 2022).

Um dos principais desafios no uso de drones para levantamentos é o custo dos equipamentos, como os de asa-fixa, que podem ultrapassar R\$ 150.000,00. Diante disso, a utilização de drones e sensores mais acessíveis é fundamental para tornar viável o uso dessa tecnologia no

mapeamento e monitoramento de áreas agrícolas.

A disponibilidade de drones e sensores mais econômicos amplia as possibilidades de aplicação dessas ferramentas, especialmente na agricultura. Essa acessibilidade permite a geração de índices de vegetação e outros dados essenciais para o manejo agrícola de maneira mais econômica e eficiente. Assim, agricultores e gestores de terras podem tomar decisões mais informadas e precisas, promovendo um uso mais sustentável e eficaz das áreas agrícolas.

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a eficácia de tecnologias de custo acessível, como o drone Phantom 4 PRO e a câmera multiespectral MAPIR Survey 3W, no monitoramento de cultivos de soja na região de Jataí-GO. Para isso, são comparados os índices de vegetação, extraídos tanto das imagens capturadas pelo drone quanto do satélite Sentinel-2, utilizando modelos estatísticos, como o coeficiente de determinação (R^2), para verificar a correlação e a precisão das tecnologias aplicadas. Aqui, a opção pelo Sentinel-2 como referência para validação justifica-se pelo acesso gratuito às imagens de média resolução espacial e a resolução temporal de 5 dias, sendo a alternativa mais viável entre as opções de baixo custo visadas pela pesquisa.

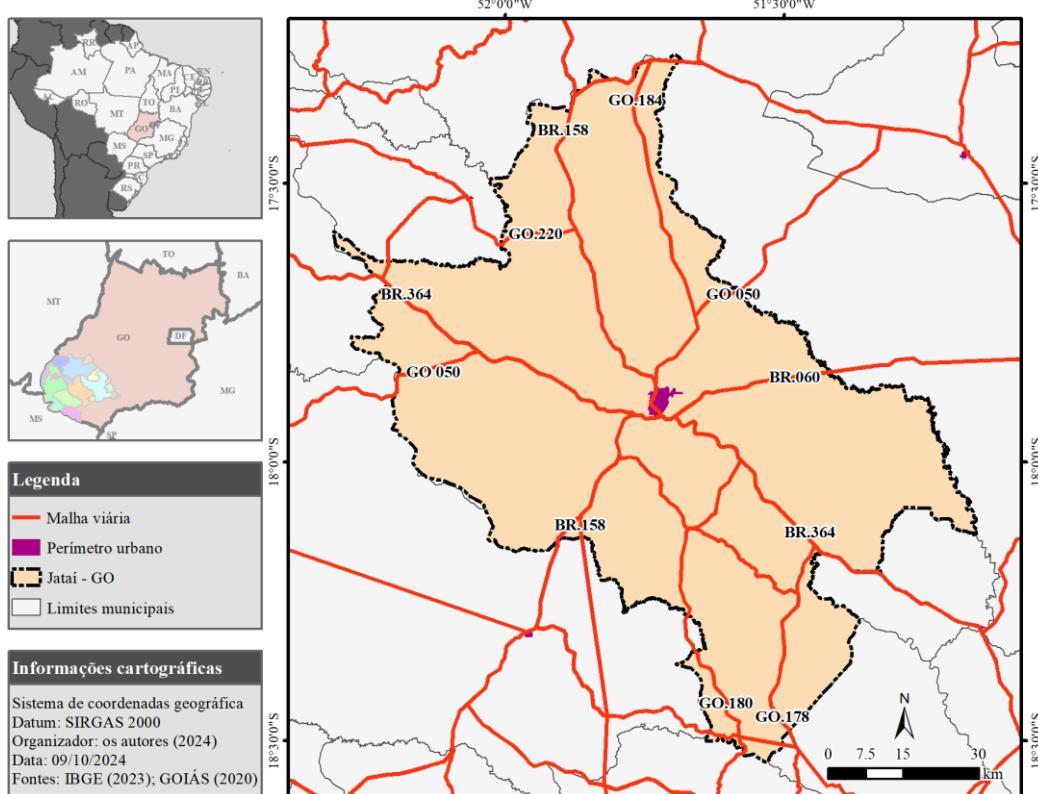
Essa questão é fundamental para avaliar o potencial e a viabilidade do uso de drones e geotecnologias na agricultura, especialmente em regiões como Jataí-GO, onde a produção agrícola é significativa. A investigação dessa questão pode fornecer resultados valiosos para agricultores, pesquisadores e gestores, contribuindo para o avanço do conhecimento e aprimoramento das práticas agrícolas na busca por maior rentabilidade e sustentabilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A região sudoeste de Goiás é uma das áreas mais produtivas do estado e do país em termos de agropecuária. A combinação de clima favorável, solo fértil e tecnologias avançadas tem permitido um desenvolvimento robusto da agricultura. O município de Jataí-GO (Figura 1) se destaca nesta região por sua significativa produção de grãos e por ser um centro de inovações agrícolas. A exploração intensiva das terras tem sido crucial para o aumento da produtividade na região, conforme apontado por Martins *et al.* (2022).

Figura 1 - Mapa de localização do município de Jataí - GO



Fonte: IBGE (2023); GOIÁS (2020). Os autores (2024).

A Universidade Federal de Jataí (UFJ) está localizada em área rural (campus Jatobá), onde são realizadas pesquisas no curso de agronomia em áreas experimentais de cultivo de grãos. Desta maneira, foram definidos dois talhões com plantio de soja para monitoramento, nomeados como “001” e “002”, medindo 7,42 hectares e 8,77 hectares, respectivamente.

Equipamentos utilizados

Foi utilizado um drone Phantom 4 PRO-DJI, com kit para imagens infravermelhas e geração de NDVI, e GPS integrado Mapir Survey 3w (Figura 2). Adquirido via financiamento da Chamada Universal MCTIC/CNPq n.º 28/2018, o drone possibilita fotos aéreas de alta resolução para aerofotogrametria, com sensores que garantem estabilidade no voo e monitoramento via smartphone.

Figura 2 - Phantom 4 PRO com suporte para câmera Mapir Survey 3w (OCN)



Fonte: Os autores (2024).

A câmera NDVI é essencial para o monitoramento agrícola, sendo um dos índices

mais precisos para capturar a assinatura espectral da vegetação. O sensor Mapir Survey

3w captura imagens de alta resolução (12 MegaPixel – 4000 x 3000 px) nos formatos RAW (12 bits por canal) e JPG (8 bits por canal), gerando uma Distância de Amostragem do Solo (termo em inglês para *Ground Sample Distance* - GSD) de 5,5 cm/px a 120 m de altura. Esse modelo, identificado como OCN (Orange, Cyan e NIR), utiliza filtros específicos: ciano (490 nm), laranja (615 nm) e infravermelho próximo (808 nm), permitindo uma análise detalhada das condições das culturas agrícolas. Além disso, possui um GNSS externo integrado (Mapir, 2020; Santos et al., 2022).

Execução dos voos e processamento dos dados

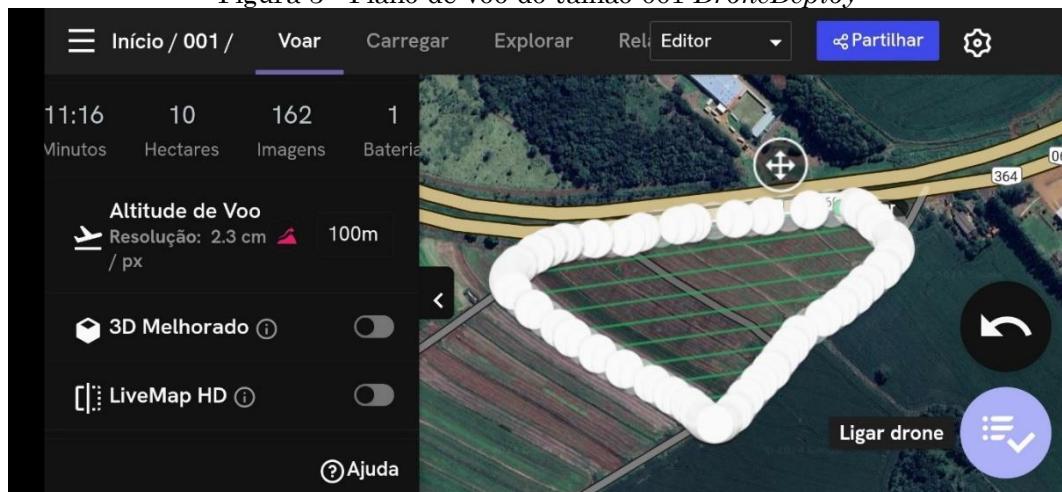
Os levantamentos aéreos foram conduzidos semanalmente para monitorar o desenvolvimento da soja em diferentes estádios fenológicos. Segundo a classificação de Fehr e Caviness (1977), o ciclo da soja é dividido em duas fases principais: estádios vegetativos (V)

que representam o crescimento inicial da planta e estádios reprodutivos (R) que marcam a transição para a fase de floração e formação dos grãos.

Para a realização dos voos, foi utilizado o aplicativo gratuito DroneDeploy, que permite a execução de voos planejados e automáticos para a captura das fotografias aéreas. Os voos ocorreram a uma altura de 100m, com sobreposição lateral e frontal de 75% (Figura 3), sempre no intervalo entre 09h e 11h para evitar variação significativa no ângulo dos raios solares, e câmera posicionada a 90°. As imagens RGB foram geradas em cor natural, sem aplicação de contraste.

Um primeiro voo foi realizado para o georreferenciamento dos talhões, utilizando o GNSS Trimble R4s de alta precisão para coletar os pontos de controle. Este voo aconteceu antes do cultivo da safra, com o solo exposto, facilitando a visibilidade dos pontos de controle. Foram coletados vinte pontos de controle no entorno e centro dos talhões.

Figura 3 - Plano de voo do talhão 001 *DroneDeploy*



Fonte: Os autores (2024).

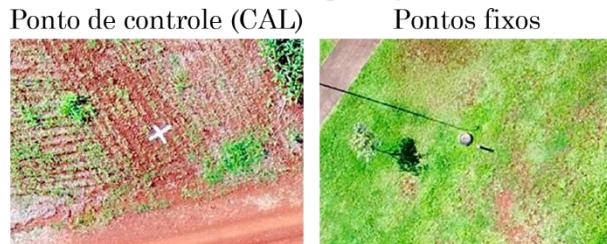
Os pontos coletados pelo GNSS foram processados no software Trimble Pathfinder Office®, com correção diferencial, e exportados nos formatos .shp e .txt. A referência para o pós-processamento foi a estação de Jataí (GOJA) pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.

As fotos aéreas foram processadas no software Agisoft Metashape®, versão 2.1.0 (Agisoft, 2023) seguindo as etapas de fotogrametria: alinhamento das imagens, geração de nuvem de pontos densa, criação do modelo digital do terreno e geração das ortofoto mosaico. O primeiro voo teve suas imagens

georreferenciadas a partir dos pontos de controle coletados em campo e processados com correção diferencial, além das coordenadas captadas pelo sistema de navegação do drone. Esse ortomosaico controlado serviu como referência para a correção dos ortomosaicos subsequentes, incluindo as imagens RGB e multiespectrais.

A correção dos ortomosaicos subsequentes foi realizada utilizando a ferramenta *georeferencing* do ArcGIS 10.8, versão 10.7.0.10450 (ESRI, 2024), em pontos fixos como postes e redes de esgoto, garantindo precisão no posicionamento das imagens (Figura 4).

Figura 4 - Ponto de controle para georreferenciamento



Fonte: Os autores (2024).

As imagens de satélite Sentinel-2, distribuídas gratuitamente pelo programa espacial da União Europeia, foram utilizadas como base adicional. Foram selecionadas as bandas: azul (B2), verde (B3), vermelha (B4) e infravermelho próximo (B8), com resolução espacial de 10 metros e critério de busca considerando 0% de cobertura de nuvens sobre os talhões.

Estas imagens foram processadas utilizando o software *SNAP*, fornecido pela Agência

Espacial Europeia (ESA). Nele, foram gerados os índices de vegetação (VARI, NDVI e IAF) e composições coloridas das imagens do satélite. Os índices gerados pelo drone foram calculados utilizando a ferramenta *raster calculator*, aplicando as fórmulas de VARI, NDVI e IAF especificadas na Tabela 1. Posteriormente, os dados foram manipulados no software ArcGIS 10.8, para georreferenciamento, cálculo de áreas, cruzamento de informações e geração de mapas temáticos.

Tabela 1 - Índices de Vegetação utilizados

IV	Fórmula	Referência	Equação
VARI	$\frac{\text{Verde} - \text{Vermelho}}{\text{Verde} + \text{Vermelho} - \text{Azul}}$	Gitelson <i>et al.</i> (2003)	Eq. 1
NDVI	$\frac{\text{NIR} - \text{Vermelho}}{\text{NIR} + \text{Vermelho}}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)	Eq. 2
IAF	$4,9 * (\text{NDVI}^2) + 0,1$	Miranda <i>et al.</i> (2020)	Eq. 3

Fontes: Gitelson *et al.* (2003), Rouse *et al.* (1974) e Miranda *et al.* (2020).

Para assegurar a coerência dos resultados ao calcular o IAF, foi necessária uma correção no índice de NDVI, com base na propriedade aditiva da igualdade. Como a câmera MAPIR gera valores negativos de NDVI em períodos com menor cobertura foliar, foi aplicado um ajuste para que os valores ficassesem em uma escala coerente. Nesse contexto, ao somar o menor valor registrado de NDVI a todos os pixels de todas as datas, o cálculo de IAF refletiu melhor as condições observadas em campo. Por exemplo, sem essa correção, um pixel de uma folha poderia apresentar NDVI de -0,1 e um pixel de solo descoberto de -0,2, fazendo com que o valor calculado de IAF para o solo descoberto fosse maior, o que não condiz com a realidade. Com essa correção, os resultados obtidos representam com maior precisão as variações das áreas estudadas.

Amostragem e Análises Estatísticas

Foi estabelecido um critério de amostragem para cada talhão, selecionando-se 9 pixels do sentinel-2, resultando em parcelas de 900 m². No talhão 001, foram analisadas 45 parcelas e no talhão 002, 68 parcelas. As amostras foram selecionadas de modo a garantir que estivessem completamente inseridos nos talhões e contivessem 9 pixels completos do sentinel-2.

Para extrair os resultados, foi utilizada a ferramenta *zonal statistics as table*, que permite realizar uma média para cada amostra de acordo com o número de pixels dentro dessa área. Dessa forma, foi extraído os valores médios de cada índice das imagens captadas pelo drone e das imagens de satélite, possibilitando a análise estatística no *Microsoft Excel* versão 2504 ([Microsoft Corporation, 2022](#)).

Ao todo, foram realizados 60 voos. Após a exclusão de imagens com alta cobertura de nuvens, as análises se centraram em sobrevoos realizados nas seguintes datas: 04/11/2022, 05/11/2022, 17/11/2022, 25/11/2022, 11/01/2023, 20/01/2023, 03/02/2023, 15/02/2023, 21/11/2023, 16/01/2024, 09/02/2024 e 22/02/2024.

A partir dos dados organizados na planilha, foi calculado o coeficiente de correlação linear de Pearson (R), o coeficiente de determinação (R^2), e o coeficiente D de Willmot *et al.* (1985). De acordo com Oliveira (2016), esse coeficiente apresentam uma escala de desempenho que varia de péssimo a ótimo, sendo: péssimo $<0,40$; mau 0,40 a 0,50; sofrível 0,50 a 0,60; mediano 0,60 a 0,65; bom 0,65 a 0,70; muito bom 0,75 a 0,85; e ótimo $> 0,85$. Além disso, foi calculada a raiz do erro médio quadrático (RMSE) para avaliar o grau de semelhança entre as observações e os dados de referência (Oliveira, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

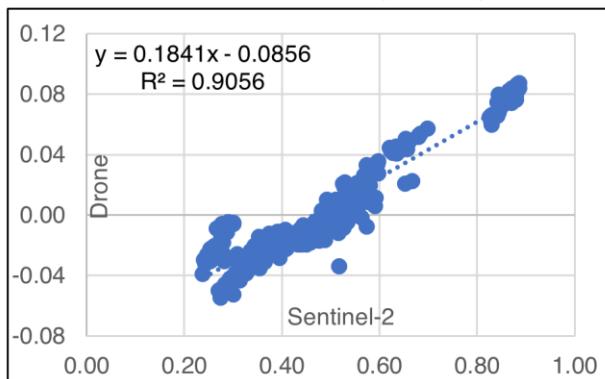
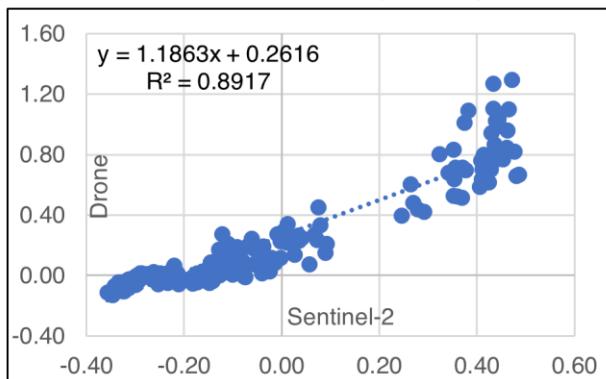
Os resultados são apresentados para os talhões cultivados com soja nas safras 2022-23 e 2023-24. Na primeira safra, o plantio ocorreu em outubro de 2022 e a colheita em fevereiro de 2023, enquanto na segunda safra o plantio foi em novembro de 2023, com colheita em março de 2024.

Conforme a Figura 5, os dados coletados mostram alta correlação entre os índices VARI e NDVI obtidos pelo drone e os dados do satélite, com coeficiente de determinação (R^2) variando entre 0,724 e 0,905, destacando-se o talhão 001 com melhores resultados. O talhão 001 apresentou R^2 de 0,891 para VARI e 0,905 para NDVI, enquanto o talhão 002 apresentou maior variação entre as safras.

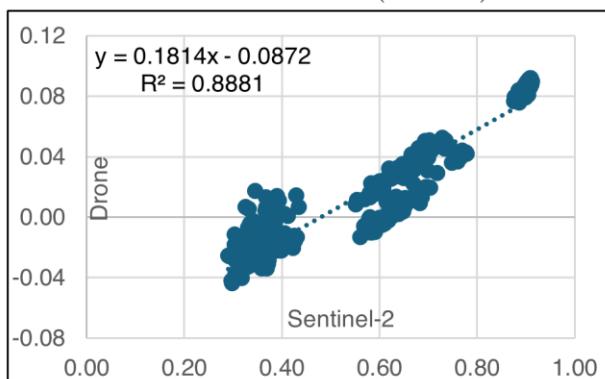
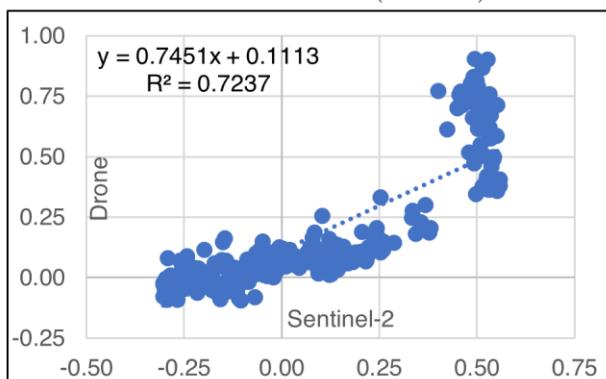
Foi observada maior dispersão nos dados do talhão 002, especialmente para o VARI. Embora o R^2 indique boa correlação, a dispersão dos dados sugere variabilidade nos índices de resposta em relação ao desenvolvimento da cultura, associada a fatores como heterogeneidade do solo.

O índice VARI tende a oscilar durante o estádio vegetativo, especialmente quando a planta desenvolve vagens, devido à sua dependência da banda visível. Em contraste, o NDVI, que usa a banda do infravermelho, mantém-se mais estável e apresenta correlação mais precisa com as imagens de satélite, refletindo melhor a estrutura celular das plantas. Esse comportamento dos índices é evidente ao longo do ciclo de plantio.

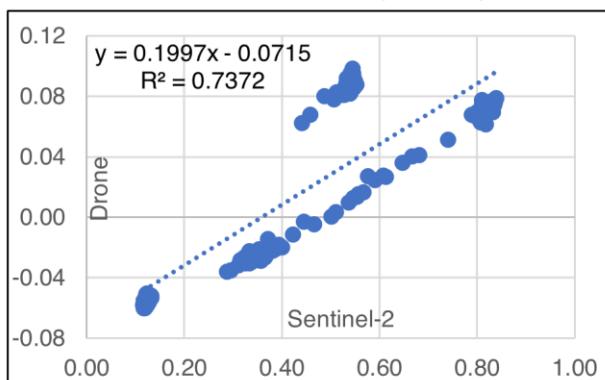
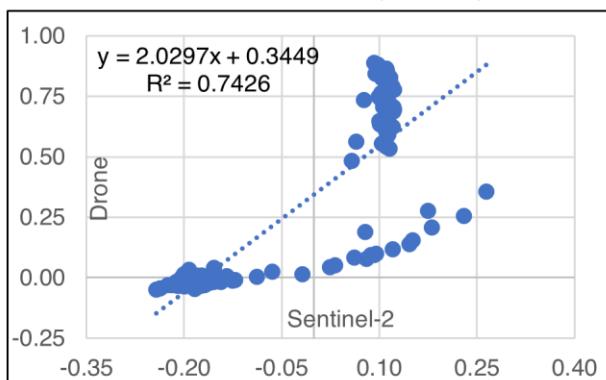
Figura 5 – Coeficiente de determinação (R^2) geral para o cultivo de soja nos talhões 001 e 002
Talhão 001 - VARI (2022/23)



Talhão 002 - VARI (2022/23)



Talhão 002 - VARI (2023/24)

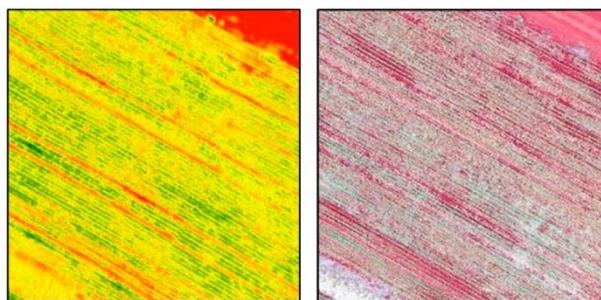


Fonte: Os autores (2024).

No talhão 001, os índices NDVI e IAF mostraram desempenho relativamente mais baixo nos dias 05/11/2022 e 11/01/2023, com valores de R^2 entre 0,70 e 0,73. Esse desempenho

menor no início do ciclo se deve à baixa densidade de cobertura foliar, o que intensifica a influência espectral da palhada e do solo exposto (Figura 6).

Figura 6 - Resposta espectral do NDVI com palhada e solo descoberto presente no talhão 001
 05/11/2022 - NDVI 05/11/2022 - RGB



Fonte: Os autores (2024).

O NDVI e o IAF, medidos pela câmera MAPIR, registraram valores de -0,019 e 0,416, enquanto o Sentinel-2 mostrou valores médios de 0,269 e 0,275, reforçando a influência do solo exposto. A câmera MAPIR, apesar de registrar valores de NDVI abaixo das referências do satélite, permite identificar áreas de estresse vegetal e uso da terra com alta resolução, como apontado por Santos *et al.* (2022) e Koopmans (2020).

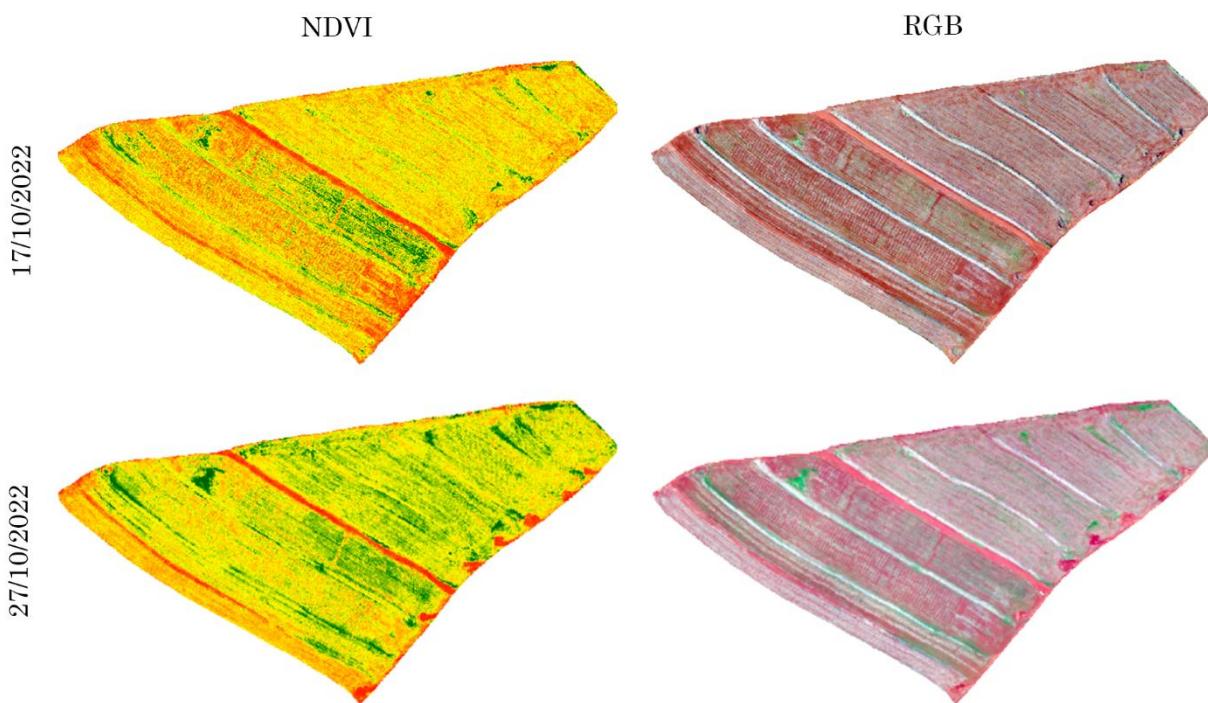
No dia 11/01/2023, o valor reduzido de NDVI e IAF é atribuído a uma diferença de quatro dias entre a imagem capturada pelo drone e a imagem do satélite, substituída pela imagem do dia 15/01/2023 devido à cobertura de nuvens. Nos dias 17/11/2022, 25/11/2022, 03/02/2023 e 15/02/2023, as comparações com diferença de apenas um dia apresentaram resultados de R^2 elevados para NDVI e IAF, com valores de até 0,93 (ambos os talhões).

Embora entre 25/11/2022 e 11/01/2023 não tenha sido possível obter imagens de satélite livres de nuvens, os estádios de desenvolvimento

da soja são claramente identificáveis nas fotografias aéreas. Os valores de NDVI aumentaram significativamente após 25/11/2022, atingindo o pico entre 21/12/2022 e 11/01/2023, com médias de 0,079 e 0,060, respectivamente, na câmera MAPIR. Os valores do NDVI e IAF decrescem a partir de 26/01/2023 à medida que a soja avança para os estádios de maturação e colheita, com o NDVI e IAF registrados pela MAPIR em 15/02/2023 apresentando valores de -0,017 e 0,423, respectivamente. As Figuras 7, 8, 9 e 10 ilustram a variação espacial do NDVI ao longo do ciclo do cultivo de soja, da plantação à colheita.

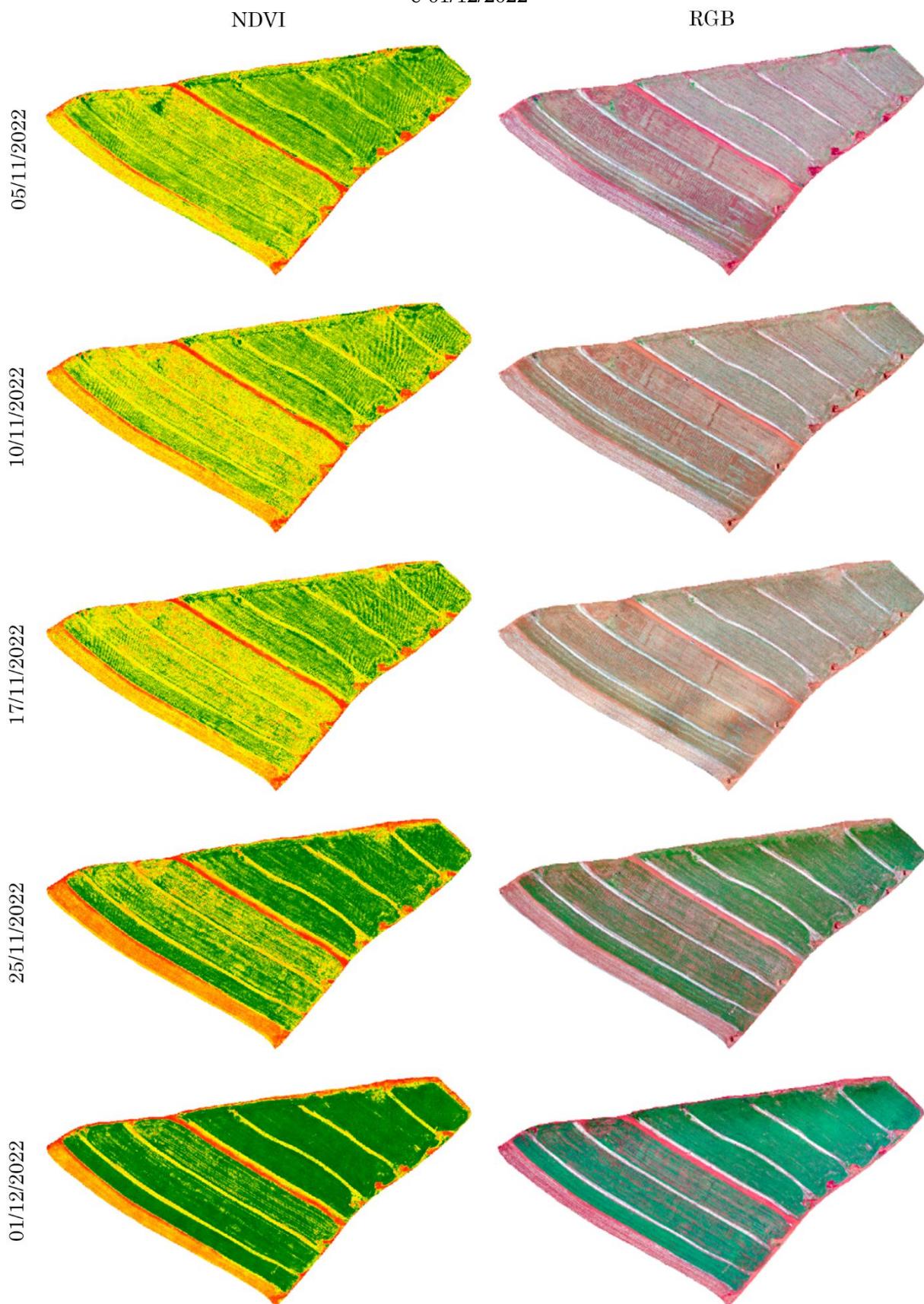
O índice de desempenho D indica ótima performance da câmera MAPIR para calcular NDVI e IAF no talhão 001, com valores acima de 0,88 para todas as datas, exceto 05/11/2022, onde o IAF registrou 0,74 devido à presença de palhada e solo descoberto. Esse bom desempenho é corroborado por valores de RMSE entre 0,04 e 0,12, refletindo o ajuste preciso do modelo.

Figura 7 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 17/10/2022 e 27/10/2022



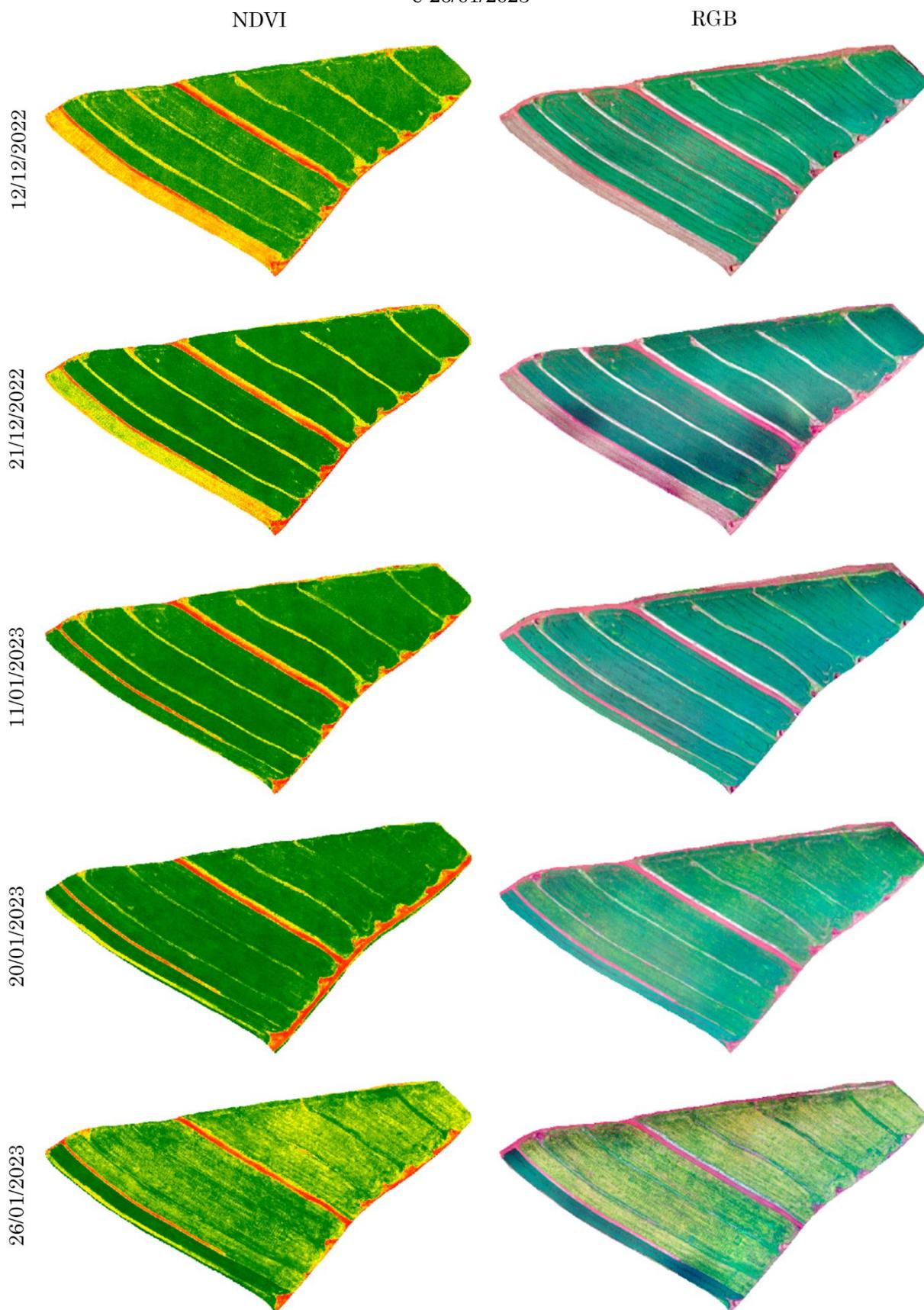
Fonte: Os autores (2024).

Figura 8 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 05/11/2022 e 01/12/2022



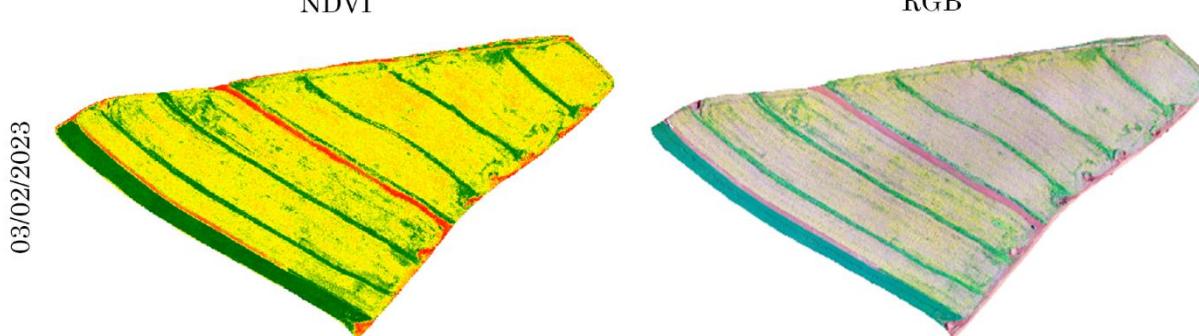
Fonte: Os autores (2024).

Figura 9 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 12/12/2022 e 26/01/2023



Fonte: Os autores (2024).

Figura 10 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, no dia 03/02/2023



Fonte: Os autores (2024).

Durante os estádios iniciais de crescimento (05/11, 17/11, e 25/11/2022), o índice VARI mostrou desempenho satisfatório, com coeficientes de determinação de 0,65 e 0,60 para as duas primeiras datas e 0,80 para a terceira, demonstrando valores médios para o drone de -0,026, -0,042 e 0,160, respectivamente, enquanto o sentinel-2 apresentou valores de -0,289, -0,285 e -0,064.

Nos dias 11/01/2023 e 03/02/2023, à medida que a soja progredia no ciclo vegetativo e entrava na fase de senescência, o VARI da câmera MAPIR registrou médias de 0,773 e 0,049, enquanto o sentinel-2 obteve 0,398 e -0,093. Isso confirma um aumento no índice no dia 11/01 e uma redução no dia 03/02, que coincide com o processo de secagem dos grãos.

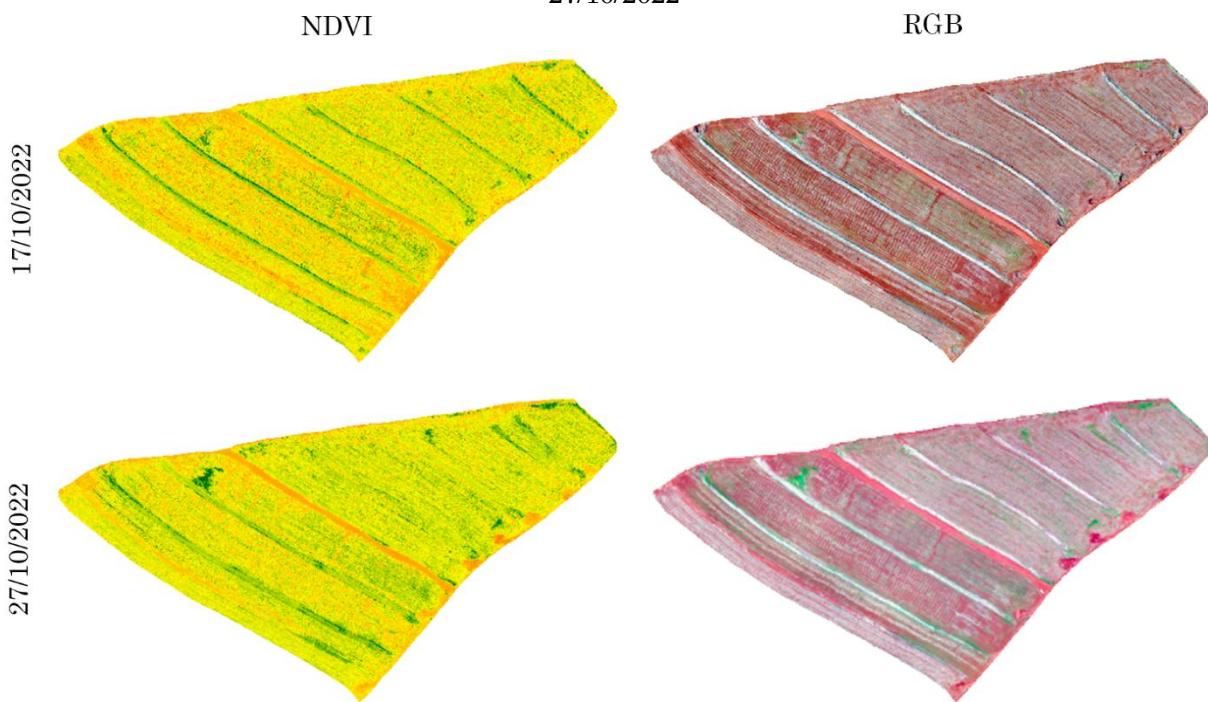
A diferença entre os valores de VARI do drone e do sentinel-2 enfatiza que a menor altura do drone (100 m) minimiza interferências atmosféricas, resultando em dados mais precisos, enquanto o sentinel-2, operando em órbita média, está mais suscetível a variações atmosféricas.

Apesar das variações no R^2 do VARI, os índices D e RMSE mostraram alta precisão para a maioria das datas, com D superior a 0,81 e RMSE entre 0,01 e 0,04, exceto em 11/01/2023, quando D foi 0,49. Esse resultado destaca que a câmera OCN, com captura em infravermelho, é mais adequada para observar esses aspectos.

As Figuras 11, 12 e 13 demonstram a variação espacial do VARI para o talhão 001 na safra 2022/23. Embora o VARI apresente índices estatísticos ligeiramente menores que o NDVI, sua alta resolução espacial permite análises visuais detalhadas, identificando estádios de desenvolvimento da soja ao longo do ciclo.

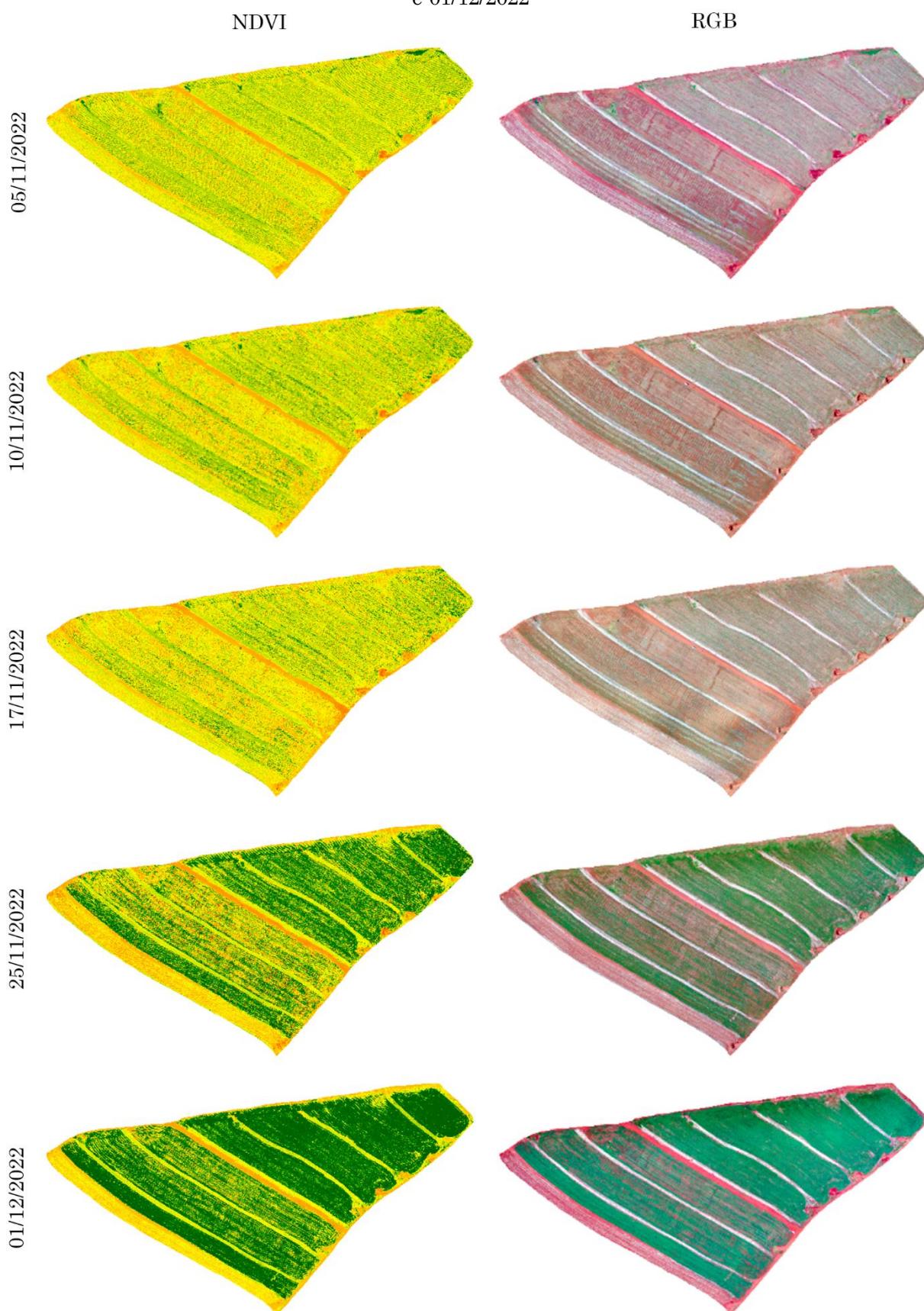
No talhão 002, durante a safra 2022/23, os índices NDVI e IAF mantiveram valores fortes e estáveis de correlação. No entanto, nos dias 04/11/2022 e 20/01/2023, esses índices apresentaram desempenho mais baixo, com R^2 entre 0,50 e 0,60, refletindo os estádios iniciais do plantio e a presença de solo descoberto (Figura 14), como no talhão 001. As médias de NDVI e IAF captadas pelo drone foram -0,010 e 0,281, enquanto as imagens de satélite registraram 0,349 e 0,396.

Figura 11 - Imagem temática demonstrando variação espacial do VARI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, nos dias 17/10/2022 e 27/10/2022



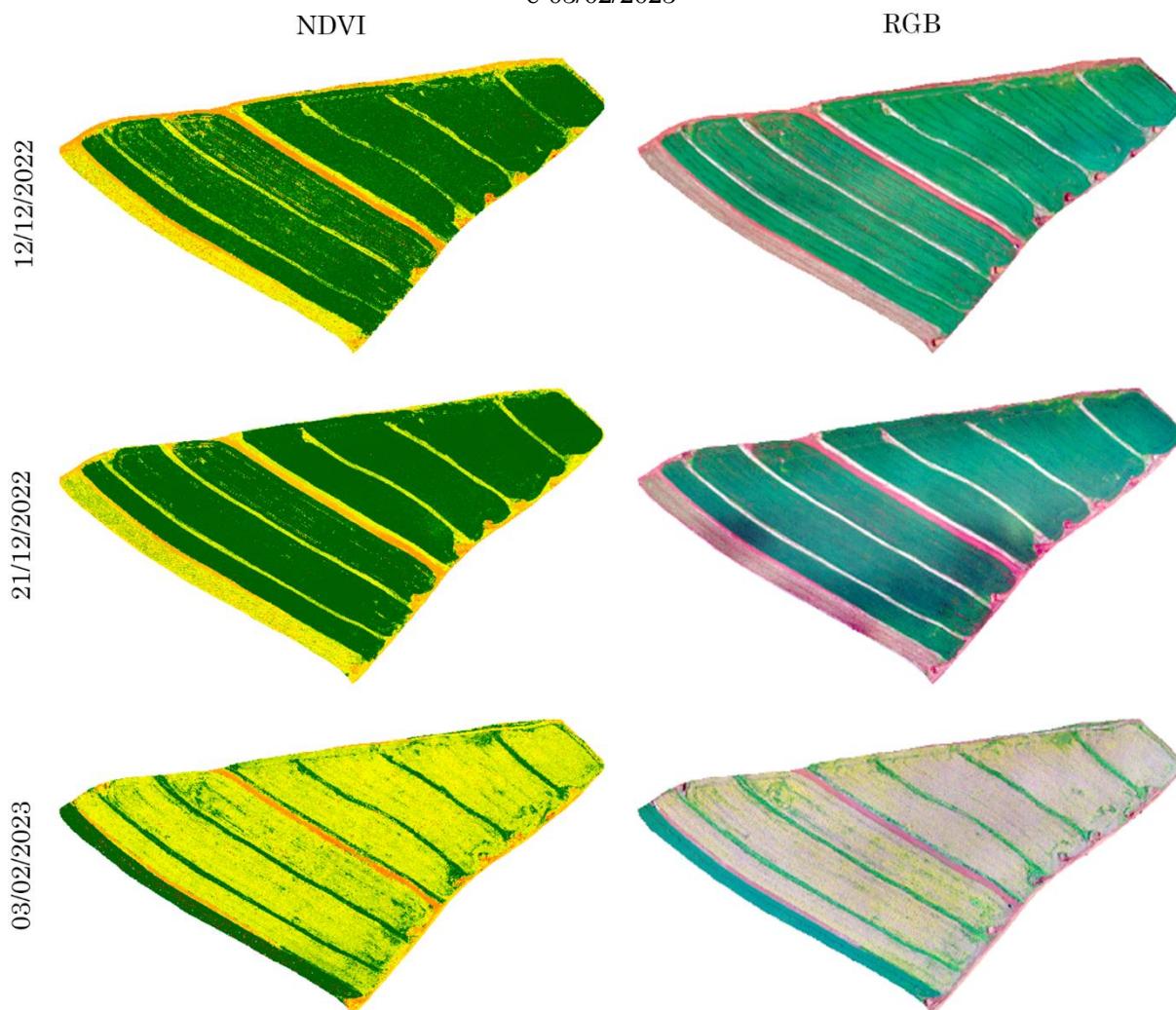
Fonte: Os autores (2024).

Figura 12 - Imagem temática demonstrando variação espacial do VARI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 05/11/2022 e 01/12/2022



Fonte: Os autores (2024).

Figura 13 - Imagem temática demonstrando variação espacial do VARI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 001 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 12/12/2022 e 03/02/2023

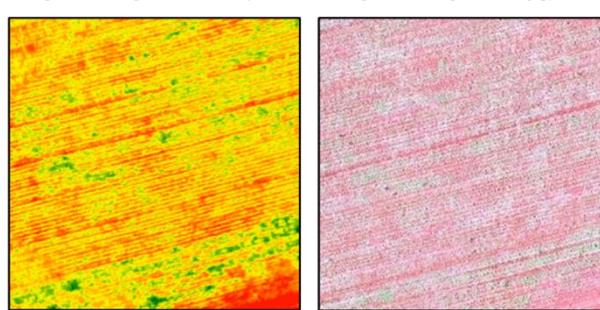


Fonte: Os autores (2024).

Os dias com os maiores valores de R^2 (17/11/2022, 25/11/2022 e 03/02/2023) apresentaram imagens com uma diferença de no máximo 2 dias entre as fotografias aéreas e as

imagens Sentinel 2, com desempenho excelente: $R^2 = 0,78$ (NDVI) e 0,77 (IAF) em 17/11/2022, e $R^2 = 0,91$ (NDVI) e 0,90 (IAF) em 25/11/2022, além de $R^2 = 0,94$ (NDVI e IAF) em 03/02/2023.

Figura 14 - Resposta espectral do NDVI com palhada e solo descoberto presente no talhão 002
04/11/2022 - NDVI 04/11/2022 - RGB



Fonte: Os autores (2024).

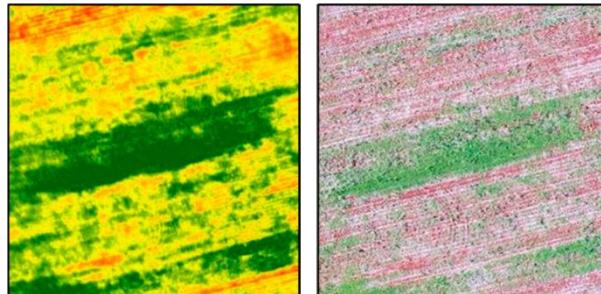
Assim como no talhão 001, é possível identificar os estádios da soja no talhão 002 por meio das imagens. Os menores valores de NDVI

ocorreram no início do plantio, nos dias 04/11/2022, 10/11/2022 e 17/11/2022, com valores médios de -0,010, -0,035 e -0,026,

respectivamente. No dia 04/11/2022 (Figura 15), além de palhada e solo descoberto, foram observadas manchas de ervas daninhas, com

valores mais elevados em comparação aos dias 10/11/2022 e 17/11/2022, quando já havia sido aplicado herbicida para dessecação.

Figura 15 - Presença de daninhas no talhão 002 no dia 04/11/2022

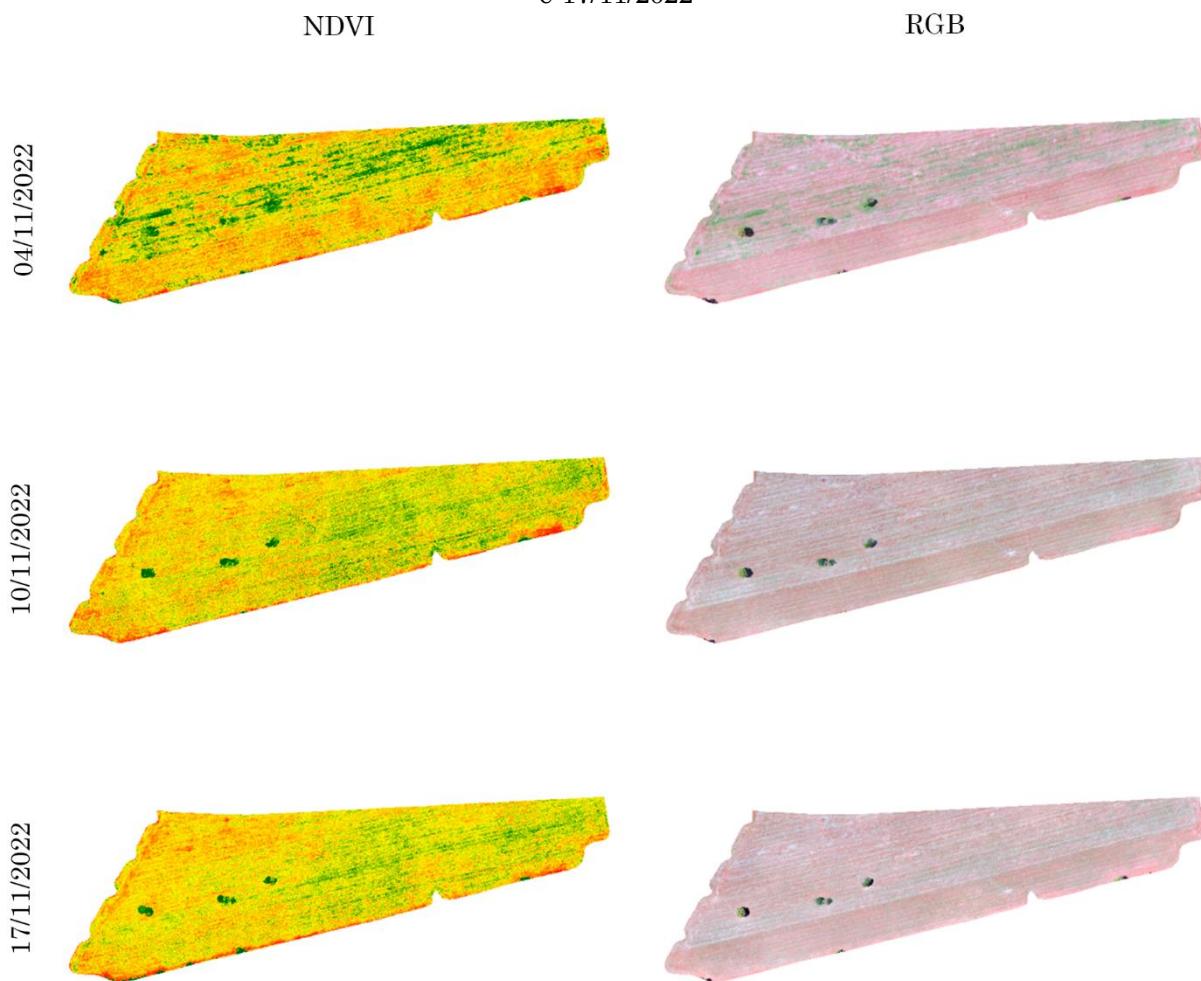


Fonte: Os autores (2024).

Nos dias 21/12/2022 e 20/01/2023, o NDVI e o IAF atingiram seus valores mais elevados, indicando maior cobertura vegetal. As médias foram de 0,090 e 0,086 para o NDVI, e 0,434 e 0,427 para o IAF, respectivamente. Esses valores foram ligeiramente inferiores aos do talhão 001 para o mesmo estádio, sugerindo uma produtividade potencialmente mais baixa

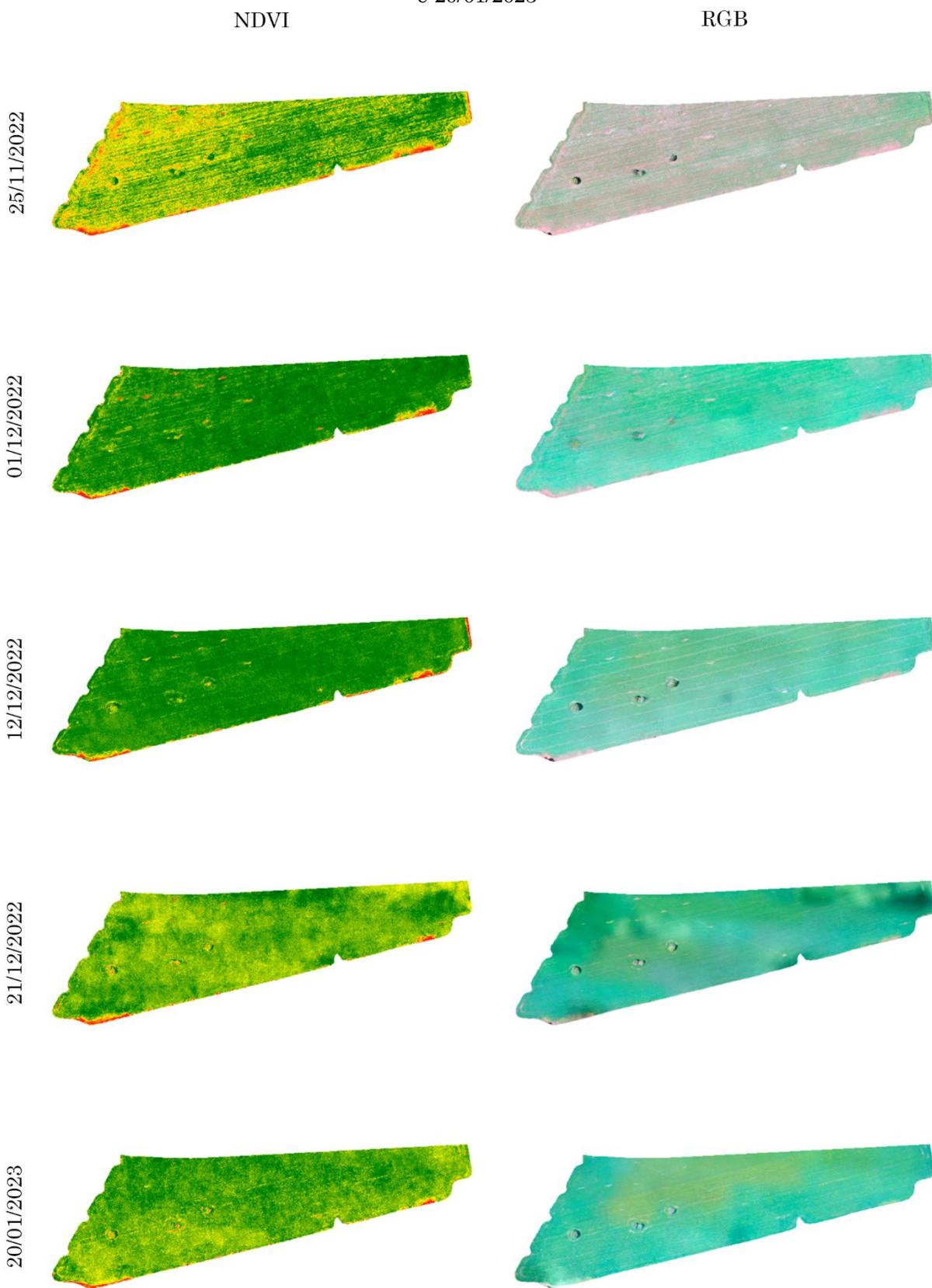
para essa área. Na fase de maturação, em 03/02/2023, os índices de vegetação começaram a decrescer, com médias de 0,009 para o NDVI e 0,307 para o IAF. Isso confirma que os índices podem ser usados para monitorar os estádios do cultivo de soja. As Figuras 16, 17 e 18 ilustram a variação espacial do índice NDVI no talhão 002 durante todo o ciclo do cultivo.

Figura 16 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 04/11/2022 e 17/11/2022



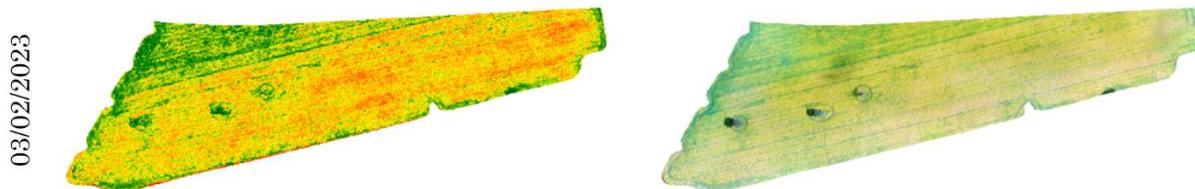
Fonte: Os autores (2024).

Figura 17 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 25/11/2022 e 20/01/2023



Fonte: Os autores (2024).

Figura 18 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2022/23, no dia 03/02/2023



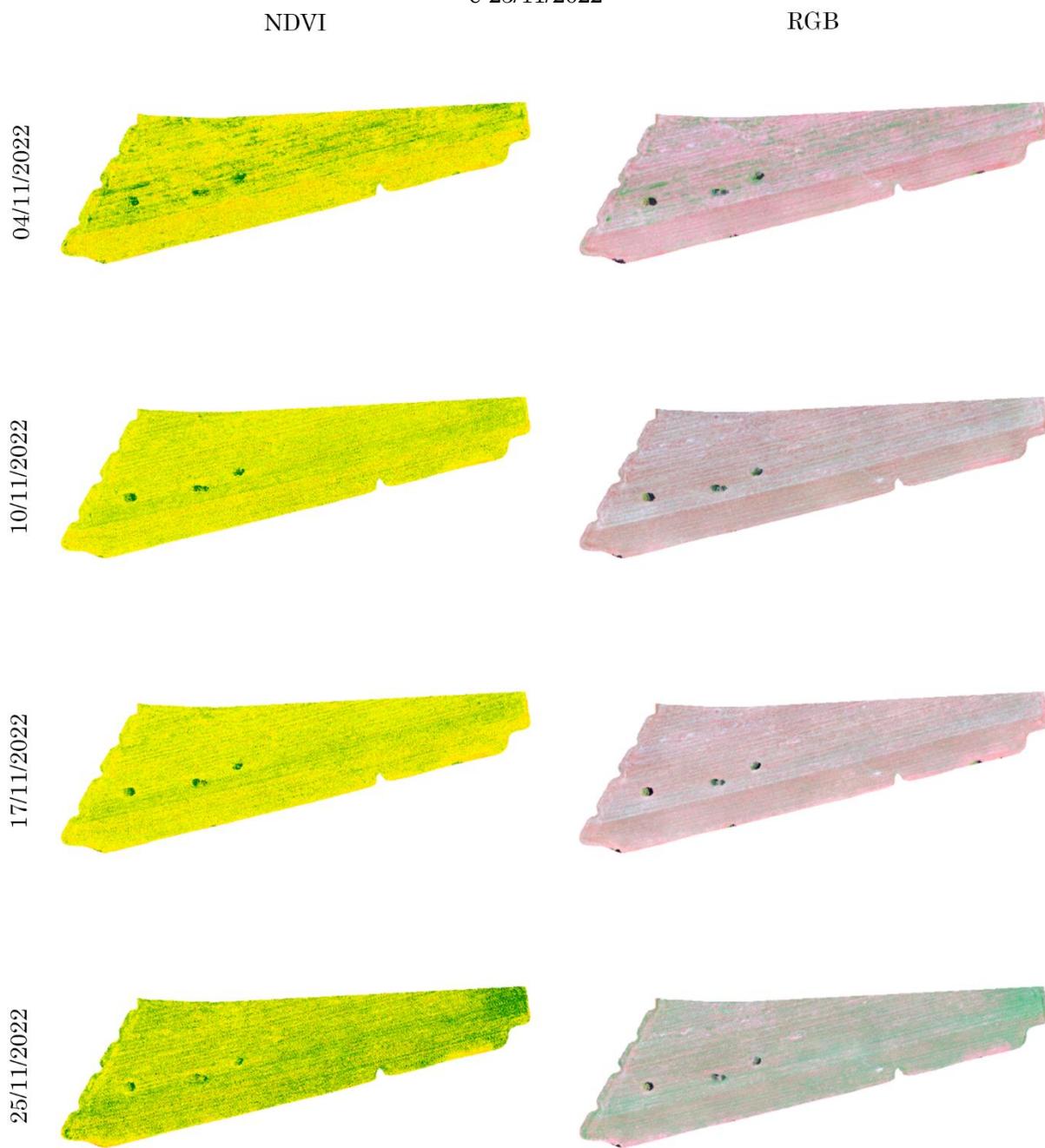
Fonte: Os autores (2024).

Os índices D e RMSE demonstraram ótimo desempenho da câmera MAPIR para o cálculo de NDVI e IAF no talhão 002, com o índice D sempre acima de 0,88 e o RMSE entre 0,05 e 0,10, confirmando o bom ajuste do modelo, similar aos resultados do talhão 001. No entanto, o VARI não apresentou bons índices de desempenho no talhão 002, com valores baixos nos dias 04/11/2022, 17/11/2022, 25/11/2022 e 20/01/2023, com exceção de 03/02/2023, que apresentou $R^2 = 0,75$, demonstrando bom rendimento. O dia 20/01/2023 apresentou o desempenho mais baixo, com uma queda no VARI captado pelo drone (0,412) em relação aos estádios anteriores, enquanto o Sentinel-2 registrou aumento (0,512), o que pode ter sido influenciado pela diferença de 5 dias entre as imagens. Embora o VARI tenha apresentado resultados insatisfatórios, os índices D e RMSE

se mantiveram ótimos, como no talhão 001. As Figuras 19 e 20 apresentam a variação espacial do VARI no talhão 002 durante a safra 2022/23. Com base nesses resultados, foi decidido realizar um segundo levantamento na safra 2023/24 para comparar os dois levantamentos.

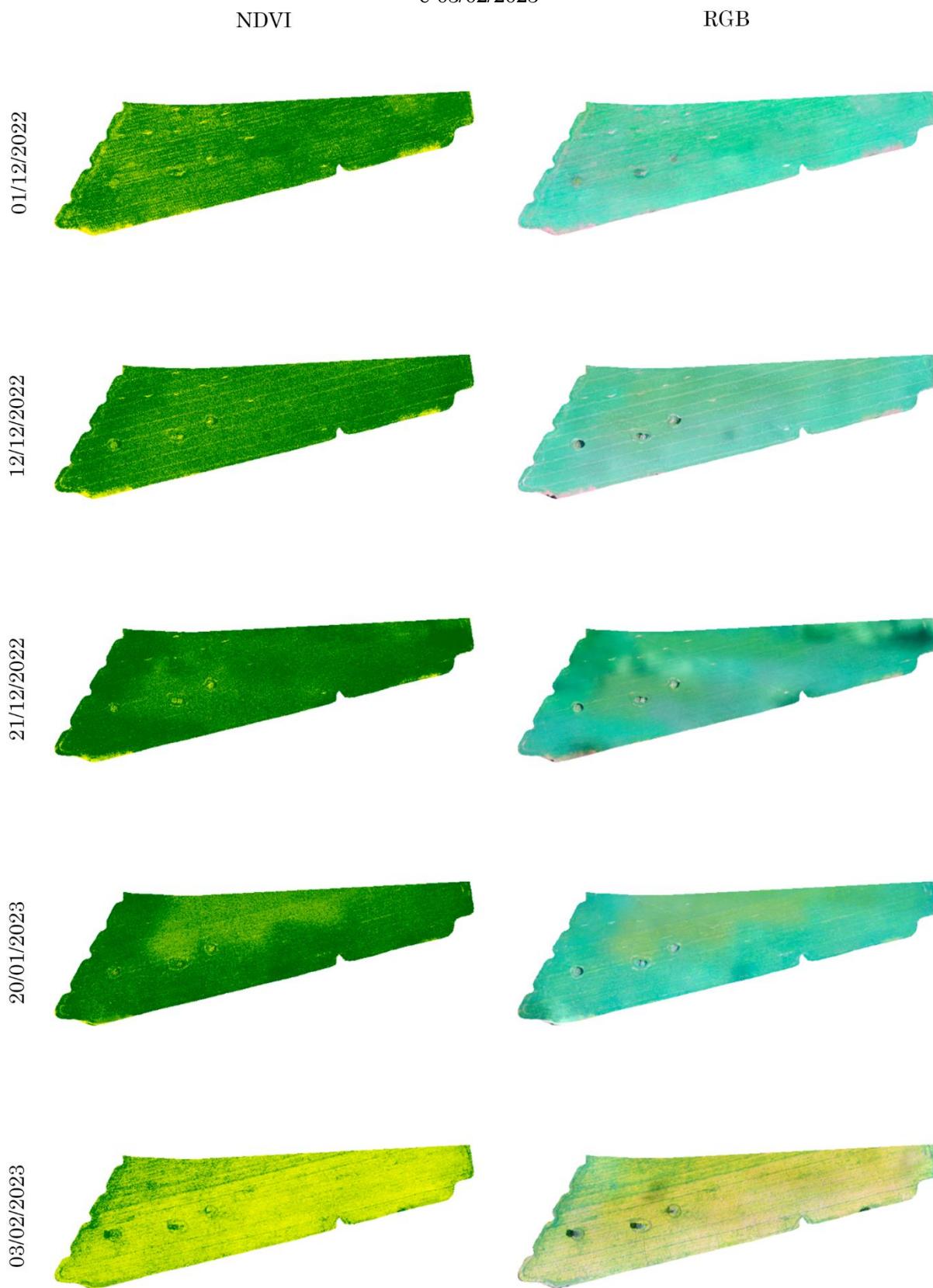
Foram realizados 7 voos, mas apenas em 4 datas foi possível comparar com as imagens de satélite. No dia 21/11/2023, devido à presença de palhada e solo exposto, os valores de R^2 foram mais baixos, com $R^2 = 0,29$ para o NDVI e $R^2 = 0,28$ para o IAF. O valor médio de NDVI registrado pela câmera MAPIR foi de -0,054, e o IAF foi de 0,268. Nesse período, teve início a construção do parque tecnológico da UFJ, que ocupou uma área pequena dentro da zona de estudo, o que resultou na exclusão de algumas amostras. O número de amostras passou de 65 para 54.

Figura 19 - Imagem temática demonstrando variação espacial do VARI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 04/11/2022 e 25/11/2022



Fonte: Os autores (2024).

Figura 20 - Imagem temática demonstrando variação espacial do VARI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2022/23, entre os dias 01/12/2022 e 03/02/2023

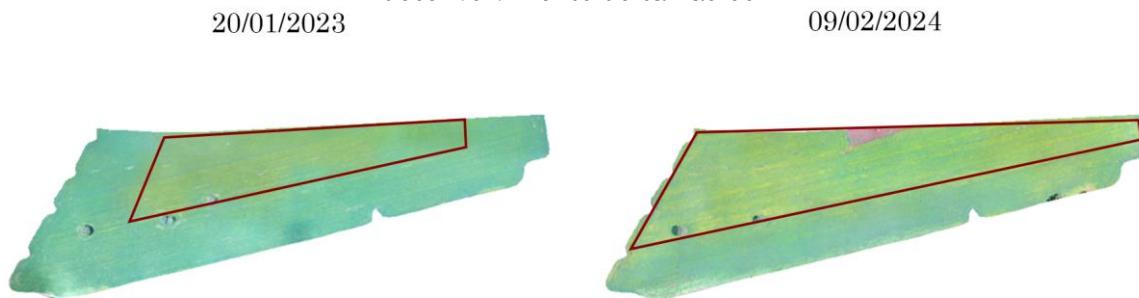


Fonte: Os autores (2024).

No dia 16/01/2024, durante o período de enchimento dos grãos, o valor médio de NDVI registrado pelo drone foi de 0,087, com IAF de 0,495, enquanto os valores do satélite foram de 0,535 para NDVI e 0,787 para IAF. Os valores de R^2 foram de 0,66 para NDVI e 0,62 para IAF. Embora os valores de R^2 sejam inferiores a 0,7, o índice D foi superior a 0,90 para ambas as variáveis, indicando um desempenho ótimo da câmera multiespectral em comparação com as imagens do Sentinel-2. A próxima imagem disponível para análise foi registrada em 09/02/2024, durante a fase de maturação e início

da senescência. Os valores médios do NDVI e IAF captados pela MAPIR foram de 0,071 e 0,465, enquanto os do Sentinel-2 foram de 0,501 e 0,703, respectivamente, um pouco mais baixos que os da data anterior. Isso indicou problemas no desenvolvimento das plantas, possivelmente devido às chuvas irregulares ou às características do solo da área, similar ao que foi observado no talhão 002 durante a safra 2022/23. A Figura 21 apresenta, na composição RGB, que o desenvolvimento das plantas na parte superior do talhão foi diferente da parte inferior.

Figura 21 - Composição RGB para os dias 20/01/2023 e 09/02/2024, demonstrando problemas no desenvolvimento do talhão 002

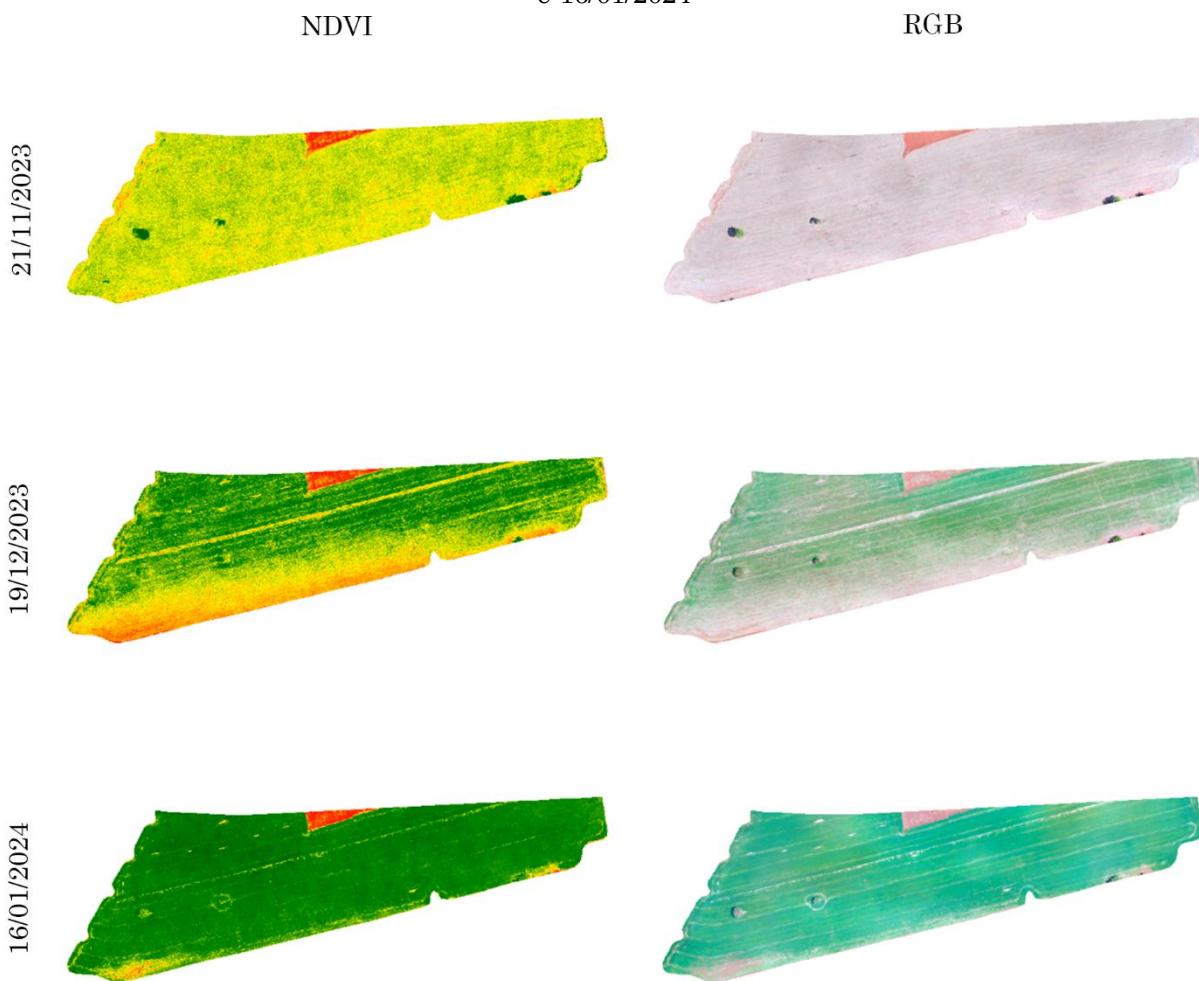


Fonte: Os autores (2024).

Na fase de maturação da planta, registrado no voo de 22/02/2024, o talhão já apresentava amarelamento progressivo das folhas. A média do NDVI e do IAF para o drone foi de -0,011 e 0,330, respectivamente, enquanto para o Sentinel-2 foram de 0,423 e 0,330. Esses valores indicam a redução dos índices em relação à data

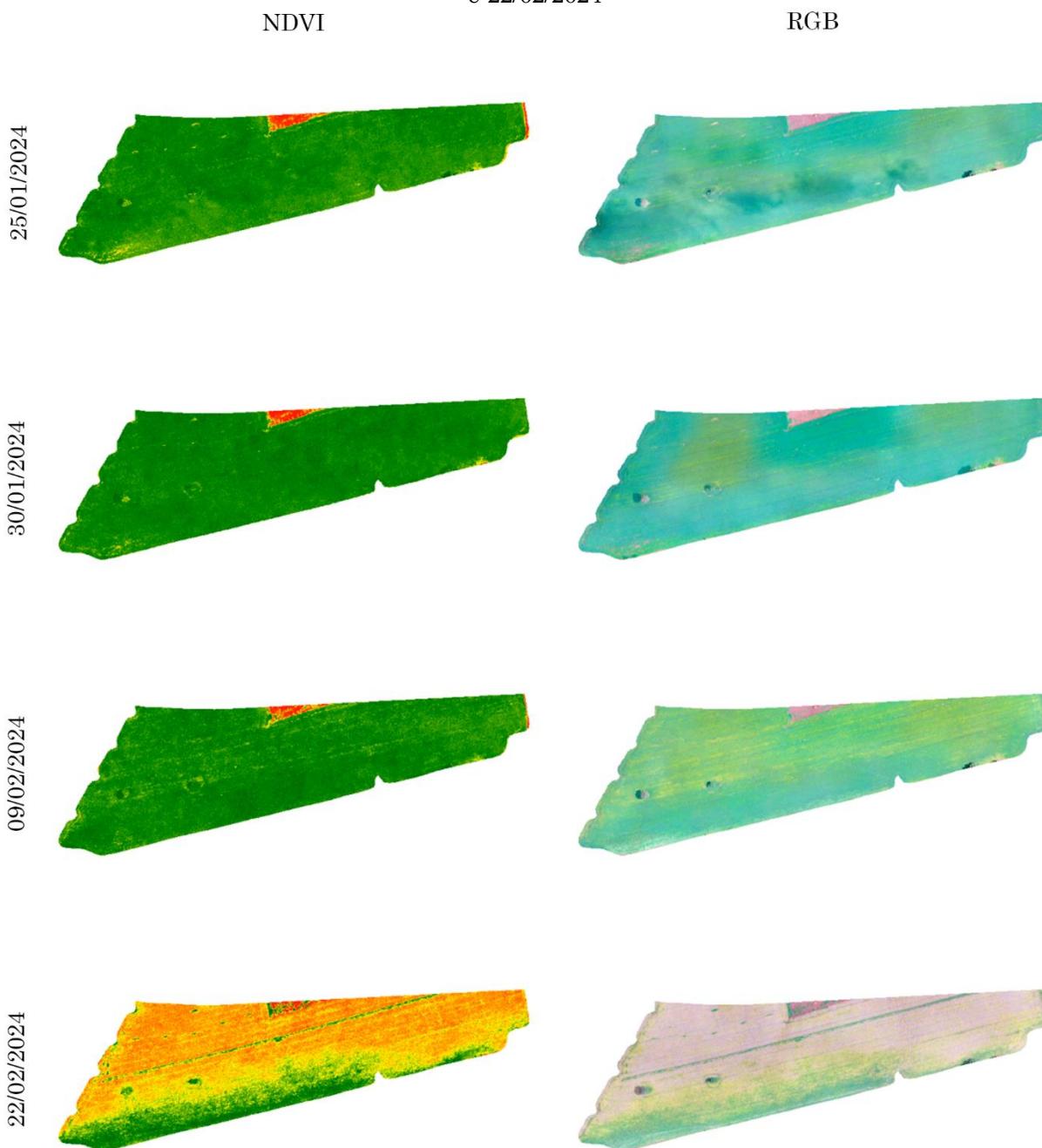
anterior, sinalizando que os grãos estavam na fase de maturação e que o planejamento da colheita já poderia ser iniciado. As Figuras 22 e 23 apresentam as imagens RGB dessas datas, juntamente com a imagem temática gerada a partir do índice NDVI.

Figura 22 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2023/24, entre os dias 21/11/2023 e 16/01/2024



Fonte: Os autores (2024).

Figura 23 - Imagem temática demonstrando variação espacial do NDVI, e imagens obtidas por drone, em tratamento RGB no talhão 002 com cultivo de soja para a safra 2023/24, entre os dias 25/01/2024 e 22/02/2024



Fonte: Os autores (2024).

Ao comparar as correlações para o talhão 002 nas duas safras analisadas, observa-se que os índices de NDVI e IAF calculados a partir das imagens de drone têm correlação mais baixa em relação ao talhão 001, que apresentou desempenho superior. Essa diferença é explicada pela falta de uniformidade no desenvolvimento das plantas no talhão 002, o que afeta os resultados. As imagens de satélite, como as do Sentinel-2, possuem resolução espacial de 10 metros, o que dificulta a captura

de variações detalhadas no desenvolvimento das plantas, especialmente em áreas heterogêneas. Em contrapartida, o drone oferece uma resolução mais detalhada, adequando-se melhor a essas áreas.

Além disso, em todas as datas, o índice D foi superior a 0,86, indicando um ótimo desempenho da câmera do drone para o cálculo de NDVI e IAF. A única exceção foi no dia 21/11/2023, quando o solo exposto e a palhada interferiram nos valores do IAF. O bom

desempenho é ainda confirmado pelos valores de RMSE entre 0,02 e 0,10, demonstrando um ajuste eficaz do modelo para essas variáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As geotecnologias de monitoramento agrícola, em especial o uso de drones equipados com câmeras multiespectrais de baixo custo, mostraram-se efetivas na análise de culturas de soja. A aplicação dessas ferramentas permitiu a coleta de dados precisos sobre o desenvolvimento das plantas, evidenciando a possibilidade de realizar análises que vão desde a identificação de falhas de plantio até o monitoramento do ciclo de desenvolvimento das culturas.

Os resultados obtidos demonstram uma boa correlação entre os índices de vegetação (VARI, NDVI e IAF) calculados a partir das imagens capturadas pelo drone de asa rotativa e as imagens gratuitas do Sentinel-2. Para a cultura de soja, o coeficiente de determinação (R^2) geral alcançou valores acima de 0,72 para o VARI e 0,73 para o NDVI. O talhão 001, em particular, destacou-se pela uniformidade, com altos coeficientes de determinação que validam a eficácia das geotecnologias empregadas. A pesquisa evidenciou que o NDVI apresentou maior robustez em estádios de maior cobertura vegetal, enquanto o VARI demonstrou limitações em cenários com maior diversidade de cultivos, especialmente no talhão 002, onde essa diversidade impactou os índices de desempenho.

Os dados coletados permitiram validar os índices de vegetação e examinar como a variação nas condições de cultivo e nas características do solo influenciou os resultados. As conclusões obtidas neste estudo ressaltam a importância de implementar estratégias de manejo mais sustentáveis e precisas para auxiliar os agricultores a tomarem decisões mais informadas.

As evidências apresentadas nesta pesquisa não apenas contribuem para a discussão sobre a eficácia do uso de drones na agricultura, mas também abrem caminho para estudos futuros que explorem a integração de diferentes tecnologias e abordagens. Sugere-se que pesquisas subsequentes investiguem a relação entre os índices de vegetação e as características do solo, bem como o impacto de pragas e doenças nas culturas.

A relevância dos estudos realizados nesta pesquisa reflete o potencial das geotecnologias para transformar práticas agrícolas, proporcionando um manejo mais eficiente e

sustentável. Com isso, espera-se que os resultados apresentados sirvam de base para futuras investigações e para possibilitar que órgãos públicos, profissionais recém-formados, laboratórios de pesquisa, pequenas empresas e pequenos agricultores possam utilizar dessas tecnologias como ferramentas de auxílio na tomada de decisão.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado por meio do processo nº 23854.006647/2022-13. O segundo autor agradece a bolsa Produtividade em Pesquisa (PQ2) do CNPq por meio do processo 307438/2021-0.

FINANCIAMENTO

Processo Nº 23854.006647/2022-13, Edital de Bolsas de Pós-Graduação Capes. Bolsa de Mestrado do primeiro autor. Título: Estudo de Viabilidade de Uso de Drones de Asa Rotativa no Monitoramento e Mapeamento de Cultivos de Ciclo Curto.

Processo 307438/2021-0, Edital Bolsa Produtividade Cnpq– 2021. Título: Aerofotogrametria Aplicada ao Mapeamento e Monitoramento de Experimentos Agropecuários;

Processo 409915/2018-1, Edital Universal Cnpq – 2018. Título: Estudo de Viabilidade do Uso de Drones para Levantamentos Aerofotogramétricos: Aplicações em Planejamento Urbano, Regularização Fundiária e Monitoramento Agrícola e Ambiental.

REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC. Agisoft Metashape®. Agisoft, 2023. (licenciado para o segundo autor da pesquisa – Universidade Federal de Jataí – UFJ).
- ALZAHHRANI, B.; OUBBATI, O. S.; BARNAWI, A.; ATIQUZZAMAN, M.; ALGHAZZAWI, D. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 166, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102706>

- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; SILVA, S. P. da; SETÚBAL, I. S.; SOUZA, H. A. de; VIEIRA, P. F. M. J.; CASARI, R. A. C. N. Predicting soybean grain yield using aerial drone images. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n.6, p.466-476, 2022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p3-9>
- CARVALHO, G. A.; LEITE, D. V. B. **Geoprocessamento na gestão urbana municipal a experiência dos municípios mineiros Sabará e Nova Lima.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. **Anais** [...]. Natal: INPE, 2009, p. 3643-3650. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@8/0/2008/11.14.21.52/doc/3643-3650.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro (ICA 100-40).** Brasil, 2020. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-100-40>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. ArcGIS PRO® ESRI, 2024. (licenciado para o segundo autor da pesquisa—Universidade Federal de Jataí—UFJ).
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development.** Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. p.11 (Special report, 80). Disponível em: <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/90239>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T. J. Remoteestimation of leaf area index and green leaf biomass in maizecanopies. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 5, p. 52, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>
- GOIÁS. Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento. Sistema Estadual de Geoinformação – SIEG. Camada de rodovias (BR's). Goiânia: SEGPLAN, 2020. Disponível em: <https://sieg.go.gov.br>. Acesso em: 08 out. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base territorial contínua do Brasil: municípios. Rio de Janeiro. IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/download-s-geociencias.html>. Acesso em: 08 out. 2024.
- KOOPMANS, M. **Enhancement of geodata:** The assessment of a near-infrared UAV sensor and a performance study of a low-cost dual-frequency GNSS receiver. FutureWater. 2020. Disponível em: https://www.futurewater.nl/wp-content/uploads/2020/12/Final_internship_report_Myke_Koopmans.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.
- MAPIR. **How to Choose a Survey3 Camera Model.** 2020. Disponível em: <https://www.mapir.camera/pages/how-to-choose-a-survey3-camera-model>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- MARTINS, ALÉCIO PERINI; Morais, Wilker Alves; PÔSSA, ÉVELYN MÁRCIA; CASTRO, RAYSA MORAES; BORGES DE MOURA, DERICK MARTINS. USLE modelling of soil loss in a Brazilian cerrado catchment. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 27, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100788>
- MATIAS, G. R de M.; GUZATTO, M. P.; SILVEIRA, P. G. **Mapeamento topográfico cadastral por integração de imagens adquiridas com VANT a técnicas tradicionais.** 2015, 175f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/115412/000963866.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- MICROSOFT CORPORATION. Microsoft Excel®. Microsoft, 2022. (licenciado para o autor da pesquisa).
- MIRANDA, R. Q.; NÓBREGA, R. L. B.; MOURA, M. S. B.; RAGHAVAN, S.; GALVÍNCIO, J. D. Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101992>
- OLIVEIRA, R. P. de. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agronômico. **RECoDAF – Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n.1, p.89-109, 2016. ISSN: 2448-0452. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/153090/1/2016-131.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** 7ª ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. <https://doi.org/10.14393/EDUFU-978-85-7078-219-9>
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.** Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351, Washington DC, p.309-317, 1974. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/1974002261>

<4/downloads/19740022614.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SANTOS, C. V. B. dos; MOURA, M. S. B. de; CARVALHO, H. F. de S.; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. de Q.; NISHIWAKI, A. A. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.12, n.03, p.109-123, 2022.
<https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.254276>

SCHWALBERT, R. A.; AMADO, T.; CORASSA, G.; POTT, L. P.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. A. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107886>

SILVA JUNIOR, C. A.; NANNI, M. R.; SHAKIR, M.; TEODORO, P. E.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.

F. de; CEZAR, E.; GOIS, G. de; LIMA, M.; WOJCIECHOWSKI, J. C.; SHIRATSUCHI, L. S. Soybean varieties discrimination using non-imaging hyperspectral sensor. **Infrared Physics & Technology**, v.89, p.338-350, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.027>

WILLMOT, C. J.; ACKLESON S. G.; DAVIS R. E.; FEDDEMA J. J.; KLINK K. M.; LEGATES D. R.; O'DONNELL J.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of geophysical research**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.
<https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Carlos Eduardo Damasceno: conceitualização, coleta de dados, análise de dados, elaboração do manuscrito, redação, discussão dos resultados.

Alécio Perini Martins: conceitualização, análise de dados, redação – revisão e edição.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.