

MONITORAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DAS CULTURAS MILHO-ABÓBORA EM CONSÓRCIO POR MEIO DE DIFERENTES ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Julia Alves de Oliveira¹
Leonardo Pinto de Magalhães²
Rafael Gabone Iacobucci³
Victor Augusto Forti⁴
Adriana Cavalieri Sais⁵

RESUMO

O sensoriamento remoto e a utilização de índices de vegetação têm sido ferramentas importantes na obtenção e análise de informações geográficas na gestão dos sistemas de produção agrícola. O objeto da pesquisa foi avaliar o crescimento e desenvolvimento das culturas do milho e da abóbora em sistema de consórcio por meio da análise de imagens obtidas por Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) e da aplicação de índices de vegetação derivados do espectro visível (fNDVI, VARI e GLI). Com uso do RPA Matrice 300 com sensor Zenmuse H20T, foram realizados 15 voos entre outubro de 2023 e fevereiro de 2024, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos. Seguidas por processamento nos *softwares* Agisoft Metashape e QGIS, onde foram extraídos os índices de vegetação para análise. Os resultados mostraram que o comportamento dos índices foi correspondente aos aspectos fenológicos das culturas encontrados na literatura: valores baixos do índice no início do ciclo, com aumento progressivo até o fechamento do dossel e posterior estabilidade nos dados devido ao hábito indeterminado das abóboras. O VARI mostrou maior sensibilidade às variações da vegetação em relação ao solo exposto, com variação de 0,325, enquanto o GLI e fNDVI tiveram variação de 0,196 e 0,250, respectivamente. O GLI foi o único índice que obteve médias positivas (0,078) ao longo do ciclo. Na análise de cluster entre as parcelas, as parcelas controle se mantiveram em agrupamentos separados das parcelas consorciadas, evidenciando a influência do consórcio no desenvolvimento das culturas. A abordagem demonstrou ser eficaz para monitoramento do crescimento e desenvolvimento de sistemas consorciados de milho e abóbora, com potencial para otimizar práticas em sistemas de cultivo consorciados.

PALAVRAS-CHAVES: Sensoriamento remoto; Aeronave Remotamente Pilotada; Aspectos fenológicos.

¹Mestranda em Agroecologia e Desenvolvimento Rural; Bacharel em Agroecologia; Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR; Departamento de Desenvolvimento Rural; Araras – SP, Brasil, Email: juliaalves@estudante.ufscar.br

²Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas; Mestre em Engenharia de Sistemas Agrícolas; Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR; Departamento de Desenvolvimento Rural; Araras – SP, Brasil, Email: leonardo.magalhaes@alumni.usp.br

³Engenheiro Agrônomo; Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR; Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural; Araras – SP, Brasil, Email: rafaelgabone@gmail.com

⁴Doutor em Fitotecnia; Mestre em Fitotecnia; Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR; Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural; Araras – SP, Brasil, Email: viaugu@ufscar.br

⁵Doutora em Engenharia Agrícola; Mestre em Engenharia Agrícola; Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR; Departamento de Desenvolvimento Rural; Araras – SP, Brasil, Email: acsais@ufscar.br

MONITORING THE DEVELOPMENT OF MAIZE-PUMPKIN CROPS IN CONSORTIUM USING DIFFERENT VEGETATION INDICES

ABSTRACT

Remote sensing and the use of vegetation indices have been important tools for obtaining and analyzing geographic information in the management of agricultural production systems. The aim of this research was to evaluate the growth and development of corn and pumpkin crops in a consortium system by analyzing images obtained by Remotely Piloted Aircraft (RPAs) and applying vegetation indices derived from the visible spectrum (fNDVI, VARI and GLI). Using a Matrice 300 RPA with a Zenmuse H20T sensor, 15 flights were made between October 2023 and February 2024, at the Agricultural Sciences Center of the Federal University of São Carlos. They were then processed using Agisoft Metashape and QGIS software, where the vegetation indices were extracted for analysis. The results showed that the behavior of the indices corresponded to the phenological aspects of the crops found in the literature: low index values at the beginning of the cycle, with a progressive increase until the canopy closed and subsequent stability in the data due to the indeterminate habit of the pumpkins. VARI showed greater sensitivity to vegetation variations in relation to exposed soil, with a variation of 0.325, while GLI and fNDVI had variations of 0.196 and 0.250, respectively. GLI was the only index to have positive averages (0.078) throughout the cycle. In the cluster analysis between plots, the control plots remained in separate groups from the intercropped plots, showing the influence of intercropping on crop development. The approach proved to be effective for monitoring the growth and development of corn-pumpkin intercropping systems, with the potential to optimize practices in intercropping systems.

KEYWORDS: Remote sensing; Remotely-Piloted Aircraft; Phenological aspects.

SEGUIMIENTO DEL DESARROLLO DE LOS CULTIVOS DE MAÍZ- CALABAZA EN CONSORCIO UTILIZANDO DIFERENTES ÍNDICES DE VEGETACIÓN

RESUMEN

La teledetección y el uso de índices de vegetación han sido herramientas importantes para la obtención y análisis de información geográfica en la gestión de sistemas de producción agrícola. El objetivo de la investigación fue evaluar el crecimiento y desarrollo de los cultivos de maíz y calabaza en un sistema consorciado mediante el análisis de imágenes obtenidas por Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAs) y la aplicación de índices de vegetación derivados del espectro visible (fNDVI, VARI y GLI). Utilizando un Matrice 300 RPA con un sensor Zenmuse H20T, se realizaron 15 vuelos entre octubre de 2023 y febrero de 2024 en el Centro de Ciencias Agrícolas de la Universidad Federal de São Carlos. A continuación se realizó el procesamiento en los programas Agisoft Metashape y QGIS, donde se extrajeron los índices de vegetación para su análisis. Los resultados mostraron que el comportamiento de los índices se correspondía

con los aspectos fenológicos de los cultivos encontrados en la bibliografía: valores bajos del índice al inicio del ciclo, con un aumento progresivo hasta el cierre del dosel y posterior estabilidad en los datos debido al hábito indeterminado de las calabazas. VARI mostró una mayor sensibilidad a las variaciones de la vegetación en relación con el suelo expuesto, con una variación de 0,325, mientras que GLI y fNDVI tuvieron variaciones de 0,196 y 0,250, respectivamente. GLI fue el único índice que presentó medias positivas (0,078) durante todo el ciclo. En el análisis de conglomerados entre parcelas, las parcelas testigo se mantuvieron en grupos separados de las parcelas intercaladas, lo que demuestra la influencia del cultivo intercalado en el desarrollo del cultivo. El enfoque demostró ser eficaz para el seguimiento del crecimiento y desarrollo de los sistemas de cultivo intercalado de maíz y calabaza, con potencial para optimizar las prácticas en los sistemas de cultivo intercalado.

PALABRAS-CLAVE: Teledetección; Aeronaves pilotadas por control remoto; Aspectos fenológicos.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem sido uma ferramenta importante na obtenção e análise de informações geográficas na gestão dos sistemas de produção agrícolas. Esta técnica consiste na coleta de dados sobre determinado alvo (objeto de estudo) sem que haja contato direto com ele (LIU *et al.*, 2022). Diante da complexidade dos fatores que influenciam o manejo agrícola, tecnologias de sensoriamento remoto têm se destacado como ferramentas essenciais para monitoramento e tomada de decisão. Em especial, o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA - *Remotely-Piloted Aircraft*) vem ganhando espaço por sua capacidade de fornecer dados detalhados e em tempo real sobre o crescimento das culturas, a distribuição espacial da vegetação e possíveis estresses ambientais, através da obtenção de imagens de alta resolução (DU *et al.*, 2022). A aplicação dessas aeronaves não tripuladas permite uma maior precisão na análise agrícola, contribuindo para práticas mais sustentáveis e eficientes (LI *et al.*, 2023).

A partir das imagens aéreas é possível realizar diversos estudos sobre a paisagem ou objeto específico, sendo um deles com base nos índices de vegetação. Estes índices são modelos matemáticos baseados na reflectância da cobertura vegetal, tendo grande aplicação no monitoramento do desempenho desta cobertura, do índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, entre outros a depender do método utilizado (CRUSIOL *et al.*, 2024).

Andrade *et al.* (2019) salientam a eficiência de índices RGB, que utilizam apenas as bandas do espectro visível (vermelho, verde e azul), na avaliação de culturas agrícolas, sendo esses índices sensíveis na diferenciação de classes para classificação em solo exposto, baixo e alto vigor vegetativo. Resultados como esse tornam estes equipamentos interessantes para a agricultura, pois permitem extrair, a partir dos softwares de geoprocessamento, produtos como o modelo digital de elevação, modelo 3D, ortomosaico de imagens, estimativa de volume e curvas de nível (DARAMOLA *et al.*, 2017; PUNIACH *et al.*, 2021).

Como exemplo de índices RGB temos o índice de folha verde ou GLI (*Green Leaf Index*), que determina a intensidade de degradação da vegetação; o índice de vegetação por diferença normalizada fracionária (fNDVI - *fractional Normalized Difference Vegetation Index*) que pode ser utilizado para estimar a fração de vegetação, biomassa verde e indicador de estádios fenológicos; e o índice de vegetação com resistência atmosférica ao visível (VARI - *Visible Atmosphere Reflectance Index*) que é utilizado, entre outras funções, para estimativa da fração da vegetação, pois sofre menos influência dos efeitos atmosféricos (CAMBRAIA FILHO, 2019).

Como a maior parte dos estudos de sensoriamento remoto são voltados para monoculturas, os usos dessas ferramentas em cultivos consorciados, como milho e abóbora, ainda são pouco explorados. Avaliar a variabilidade espacial desses cultivos pode fornecer informações sobre sua produtividade, resiliência e sustentabilidade.

No âmbito da agricultura sustentável os cultivos em consórcio são de grande relevância para manutenção da agrobiodiversidade, segurança alimentar e nutricional, conservação dos agroecossistemas e diversidade de renda para agricultores (ALTIERI; FUNES-MONZOTE; PETERSEN, 2012). O consórcio é a prática de cultivar duas ou mais espécies de plantas em associação dentro de uma mesma área, de forma planejada, para que as culturas se complementem de forma benéfica. Esta associação é cuidadosamente planejada para que as plantas tenham diferentes exigências de nutrientes, água e luz, aproveitando melhor os recursos disponíveis e reduzindo a competição (PIERRE *et al.*, 2022).

Sistemas em consórcio geram grandes benefícios ao agroecossistema quando as culturas associadas são complementares; o consórcio entre o milho (*Zea mays* L.) e abóbora (*Cucurbita* spp.) é um exemplo dessa complementaridade, uma vez que as plantas recebem luz a diferentes alturas, sendo o milho a mais alta, enquanto a abóbora cresce ao nível do solo. Além disso, as

folhas da abóbora sombreiam o solo, reduzindo as plantas espontâneas e conservando a umidade do solo; as flores atraem insetos benéficos, ajudando a reduzir os danos causados pelas pragas; e o maior volume de raízes das culturas, em relação às monoculturas, aumenta a disponibilidade de água e nutrientes do sistema (FONTEYNE *et al.*, 2023).

Neste trabalho, considera-se que cultivos em consórcio podem apresentar comportamento distinto, em relação aos índices de vegetação, quando comparados com cultivos solteiros e que esses podem ser monitorados por imagens obtidas por RPA, mesmo que estejam instalados em pequenas parcelas experimentais de cultivo consorciado.

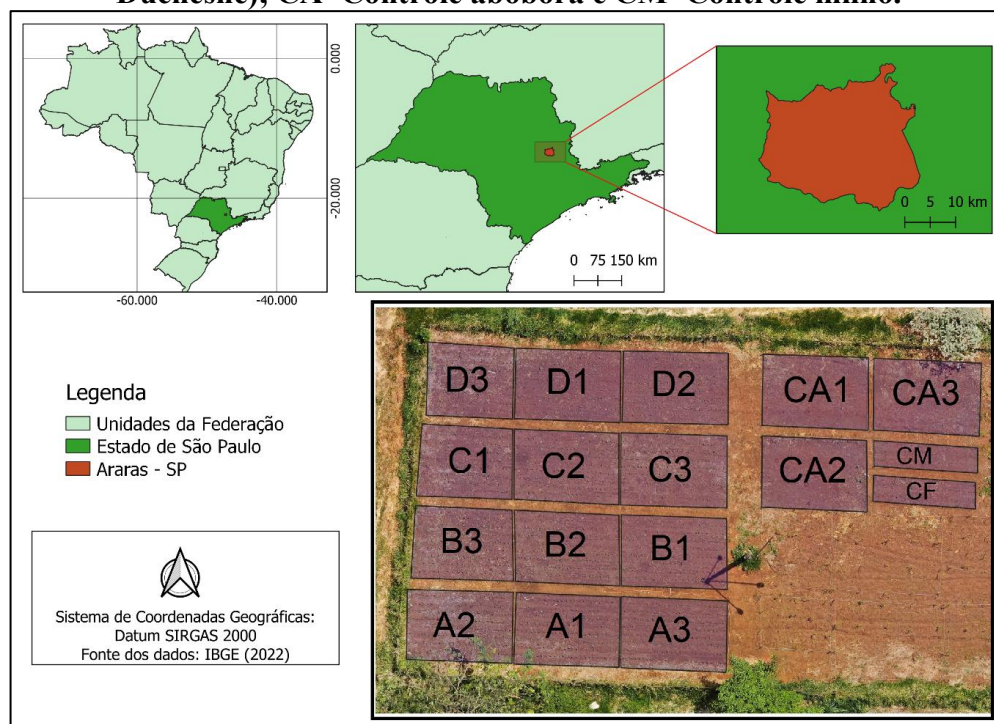
Diante disso, o objeto da pesquisa é avaliar o crescimento e desenvolvimento das culturas do milho e da abóbora em sistema de consórcio por meio da análise de imagens obtidas por Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) e da aplicação de diferentes índices de vegetação. Assim, o estudo busca: (i) monitorar o desenvolvimento das culturas, por meio da análise de índices de vegetação derivados do espectro visível; (ii) analisar a correlação entre os índices GLI, VARI e fNDVI com o crescimento das culturas; e (iii) identificar padrões de desenvolvimento a partir de análises estatísticas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na área experimental do Laboratório de Agricultura Orgânica, localizada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, campus Araras-SP (22°18'27"S, 47°22'42"W, a 648,16 m de altitude). O processamento de imagens e análises ocorreram no Laboratório Integrado de Estudos em Paisagens, Floresta e Agroecologia (LEPFA), localizado na mesma instituição.

Figura 1. Localização da área experimental do Laboratório de Agricultura Orgânica. Em destaque, área utilizada para a condução do experimento. Delimitação das parcelas experimentais, em que A, B, C e D são os blocos, em 1 foi cultivado no consórcio moranga exposição (*Cucurbita maxima* Duchesne ex Lam.), no 2 abóbora paulista (*Cucurbita moschata* Duchesne) e no 3 abóbora menina brasileira (*Cucurbita moschata* Duchesne); CA=Controle abóbora e CM=Controle milho.



Fonte: Elaborada pela autora.

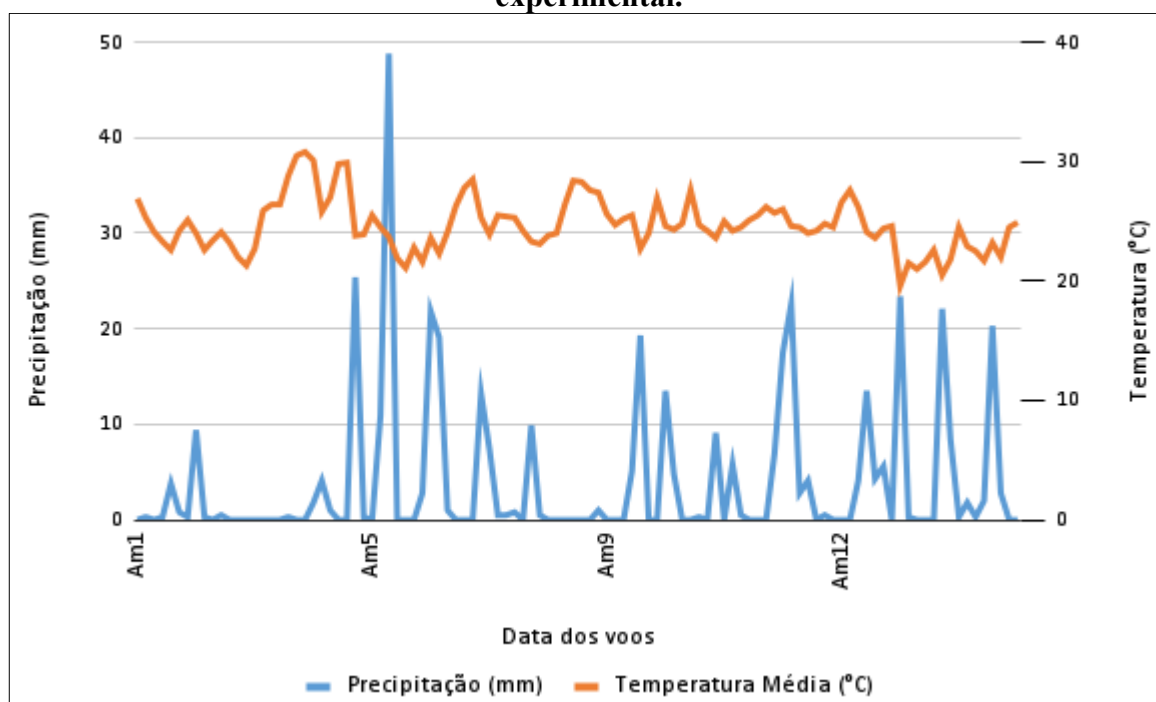
A área experimental foi composta de 16 canteiros, sendo cada um deles uma parcela experimental. O trabalho desenvolveu-se em blocos casualizados com quatro repetições para cada um dos três tratamentos. Os tratamentos eram compostos pelo cultivo consorciado de milho (*Zea mays* L.) e uma diferente variedade de abóbora. No primeiro tratamento (1) foi cultivado no consórcio a moranga exposição (*Cucurbita maxima* Duchesne ex Lam.), no segundo (2) a abóbora paulista (*Cucurbita moschata* Duchesne) e no terceiro (3) a abóbora menina brasileira (*Cucurbita moschata* Duchesne). Também houve a condução de áreas controle com monocultivo para cada uma das culturas e variedades estudadas.

Cada bloco foi composto, então, de três parcelas de 4 x 6 m, onde o milho foi plantado em linhas com espaçamento de 1,35 x 0,20 m e a abóbora 2 x 3 m. Para as parcelas de controle não houve repetições, sendo sua área de 4 x 6 m para as variedades de abóbora e 1,5 x 6 m para o milho.

A princípio este experimento contaria com a presença da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no consórcio. No entanto, devido a problemas no campo, as plantas de feijão foram retiradas por volta da quarta semana de voo. Nos resultados deste trabalho serão desconsiderados os dados dos índices de vegetação correspondente a parcela controle do feijão (CF).

A descrição do preparo de solo, adubação e manejo não é foco deste estudo e, por isso, não serão detalhados nesta metodologia. Os dados de precipitação e temperatura de todo período de captura de imagens aéreas estão apresentados na figura 2.

Figura 2. Precipitação e temperatura média entre 24/10/2023 e 06/02/2024 na área experimental.



Fonte: Elaborado pelos autores
Nota: Dados da Estação Meteorológica Automática do
Departamento de Recursos Naturais e Proteção
Ambiental do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal de São Carlos, Araras/SP.

Realização dos voos

O modelo de RPA utilizado foi o Matrice 300 com RTK (DJI, 2020). Foi utilizado o sensor Zenmuse H20T para captura de imagens no comprimento de onda visível (RGB - Red,

Green, Blue). O plano de voo para captura das imagens foi configurado com as seguintes especificações: velocidade de decolagem de 10 m/s; velocidade de voo de 1,3 m/s; ângulo do curso de 14°; altitude da rota de voo de 30 m; GSD (*Ground Sample Distance*) de 2,67 cm/pixel; sobreposição lateral e longitudinal de 90%.

Os voos ocorreram semanalmente, iniciando 13 dias após a semeadura (11/10/2023), e compreenderam o período de 24 de outubro de 2023 a 06 de fevereiro de 2024, totalizando 15 voos. Os ortomosaicos para cada data foram elaborados a partir do conjunto de imagens de cada voo, utilizando o *software* Agisoft Metashape (Agisoft LLC Inc.) com as seguintes etapas: alinhamento de imagens; obtenção da nuvem densa de pontos; obtenção do modelo digital de elevação; e, finalmente, obtenção do ortomosaico. Este produto consiste em uma ortofoto RGB com as faixas do vermelho (banda 1), verde (banda 2) e azul (banda 3). O georreferenciamento foi realizado segundo o sistema de referência de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zone 23S.

Os ortomosaicos foram introduzidos no sistema de informação geográfica QGIS (*Quantum Georeferencend Information System*), para delimitação das parcelas experimentais por meio da criação de polígonos. Posteriormente, foi realizada a extração dos índices de vegetação de cada parcela e obtenção das estatísticas descritivas. Foram utilizados três índices de vegetação para sensores que capturam imagens no intervalo de comprimento de onda do visível, sendo obtidos através da ferramenta “Calculadora Raster” do *software* QGIS.

O índice de vegetação fNDVI (*fractional Normalized Difference Vegetation Index*) proposto por Tucker (1979) é calculado por meio da diferença normalizada entre a banda Verde e a banda Vermelho Visível e retorna um valor indicativo do teor de clorofila das plantas cultivadas. Sua equação é representada por:

$$\text{fNDVI} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED}) \quad (1)$$

Em que:

GREEN = Valor de reflectância na banda do verde visível

RED = Valor de reflectância na banda do vermelho visível

Já o índice de vegetação VARI (*Visible Atmosphere Reflectance Index*), proposto por Gitelson *et al.* (2002), tem a equação representada por:

$$\text{VARI} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE}) \quad (2)$$

Em que:

GREEN = Valor de reflectância na banda do verde visível

RED = Valor de reflectância na banda do vermelho visível

BLUE = Valor de reflectância na banda do azul visível

Elaborado por Louhaichi, Borman e Johnson (2001), o Índice de Folha Verde ou GLI (*Green Leaf Index*) pode ser utilizado para distinção entre plantas vivas e o solo, plantas vivas e plantas mortas e diferenças entre o teor de clorofila das plantas presentes na imagem. A diferença do GLI em relação ao NDVI Visível é a utilização da banda Azul. Sua equação é representada por:

$$GLI = (2 \times GREEN - RED - BLUE) / (2 \times GREEN + RED + BLUE) \quad (3)$$

Em que:

GREEN = Valor de reflectância na banda do verde visível

RED = Valor de reflectância na banda do vermelho visível

BLUE = Valor de reflectância na banda do azul visível

Para todos os índices a equação retorna tanto valores positivos quanto negativos, sendo os valores negativos indicativos de solo descoberto e plantas mortas, já os valores positivos correspondem a vegetação saudável e densa. Foram empregadas estatísticas descritivas para analisar o comportamento e a distribuição espacial do fNDVI, VARI e GLI para cada ortomosaico gerado por meio de medida de posição (média) para as diferentes parcelas experimentais, estes dados foram obtidos por meio da ferramenta “Estatísticas Zonais” no QGIS. Foram também gerados gráficos de caixa e realizada a análise de *cluster* no *Software* R, a fim de acompanhar o desenvolvimento das culturas de milho e abóbora por meio da média dos índices obtidos nas diferentes datas.

O algoritmo de *clustering* agrupa as parcelas em *clusters*, buscando minimizar a variância dentro dos grupos. Ele considera apenas os valores médios dos índices para a formação dos *clusters*, sem incluir diretamente blocos ou tratamentos, embora esses fatores possam influenciar indiretamente os agrupamentos (MACIEL; VINHAS; CÂMARA, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do monitoramento do ciclo da cultura do milho e da abóbora em consórcio foram geradas quinze ortofotos que a partir delas foram calculados e analisados os índices de vegetação fNDVI, VARI e GLI. No Quadro 1 está especificado as datas dos voos.

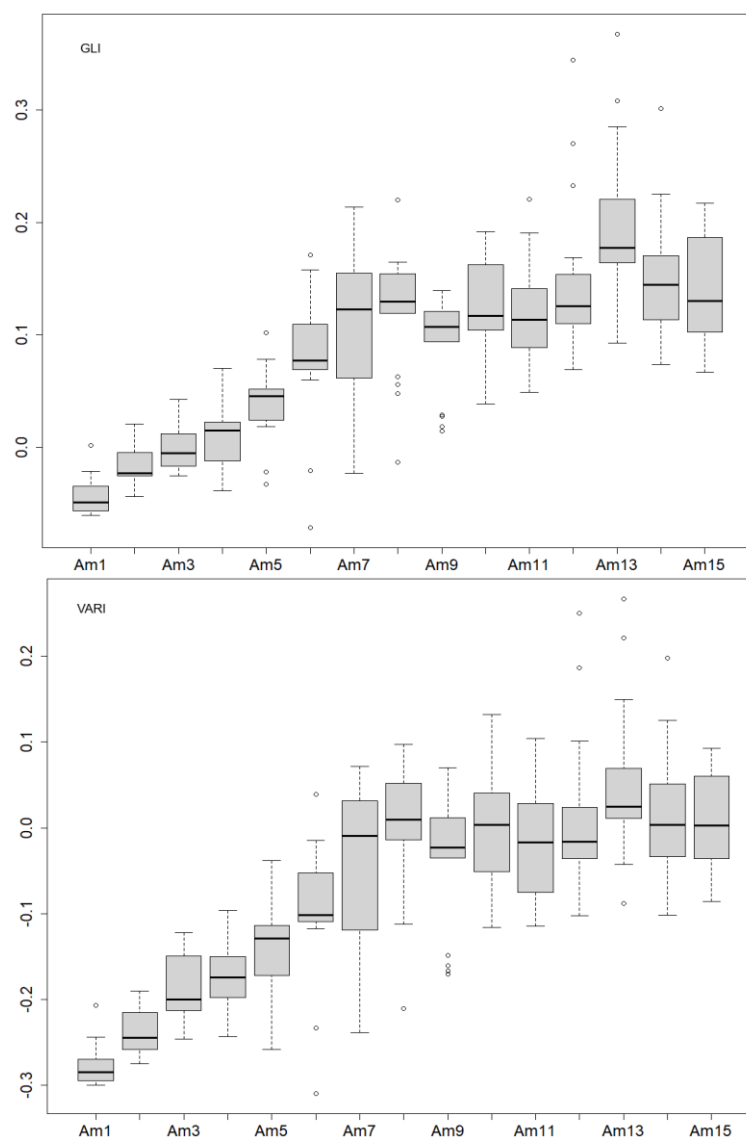
Quadro 1. Datas dos voos feitos com RPA.

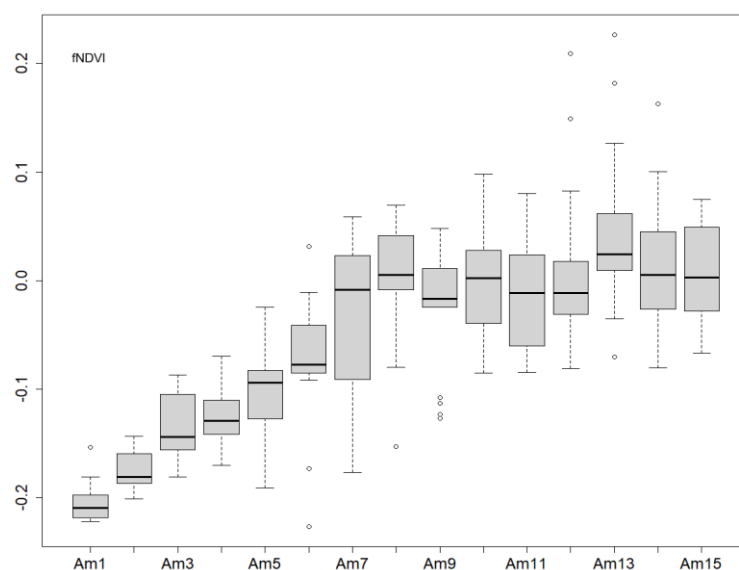
Am1 - 24/10/2023	Am2 - 31/10/2023	Am3 - 07/11/2023	Am4 - 14/11/2023
Am5 - 21/11/2023	Am6 - 28/11/2023	Am7 - 05/12/2023	Am8 - 12/12/2023
Am9 - 19/12/2023	Am10 - 02/01/2024	Am11 - 09/01/2024	Am12 - 16/01/2024
Am13 - 23/01/2024	Am14 - 30/01/2024	Am15 - 06/02/2024	

Fonte: Elaborado pela autora.

Com os dados dos índices foram gerados gráficos para comparação entre eles e análise do comportamento do crescimento das plantas. Na imagem abaixo (figura 3) é possível observar as informações de cada índice nos diferentes dias de coleta de dados.

Figura 3. Gráficos de caixa representando variações dos índices de vegetação GLI, VARI e fNDVI durante monitoramento do ciclo da cultura do Milho e Abóbora em consórcio.





Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: Eixo Y corresponde a variação dos índices de vegetação e o Eixo X as datas dos voos.

Comparando o comportamento dos índices de vegetação utilizados, o VARI apresentou maior variação (0,325) entre as datas de voo. Esse índice mostrou maior sensibilidade à variação da vegetação em relação ao solo exposto. Em contrapartida, os índices GLI e fNDVI apresentaram menor sensibilidade à variação da vegetação, ou seja, menor diferença entre o valor obtido do índice que corresponde ao solo exposto e o valor correspondente à vegetação densa. Esses índices tiveram uma distância menor entre eles quando comparado com a amplitude do VARI, sendo a variação de 0,196 para o GLI e 0,250 para o fNDVI. Ressalta-se que o índice GLI foi o único que obteve média positiva (0,078), não apresentando grande sensibilidade ao solo exposto. Enquanto isso, tanto o VARI quanto o fNDVI obtiveram a média de -0,075 e -0,054, respectivamente.

Os índices apresentaram comportamento similar (figura 3) quanto ao crescimento das plantas, com valores negativos nos estádios iniciais. Isso ocorre devido ao fato de as plantas não estarem desenvolvidas e as partes vegetativas não cobrirem totalmente o solo (SAMECIMA JUNIOR, 2018). Mas, é possível notar aumento na média dos índices, indicando, também, aumento em altura e número de ramos e folhas até a oitava semana do monitoramento (62 dias após a semeadura). Nesta data os valores dos índices GLI, VARI e fNDVI foram, 0,121, -0,003 e 0,000, respectivamente. Posteriormente, houve uma certa estabilidade nos valores, ocorrendo poucas variações até o fim do experimento.

Estes resultados podem ser associados aos estádios fenológicos das culturas. Para a cultura do milho, o aumento no valor dos índices nas primeiras semanas do crescimento da cultura indica seu estágio vegetativo. A data Am7, por exemplo, apresentou uma diferença no comportamento em relação às semanas anteriores, com alta amplitude nos valores mensurados dos índices. Isso ocorreu, pois nessa data as plantas tiveram maior crescimento do que nas datas anteriores, porém ainda havia grande presença de áreas com solo exposto, o que mostra essa diferença de amplitude nas médias mensuradas. Entre Am7 e Am8 o milho fechou o dossel, indicando o início do pendoamento (floração) e após esta semana, com o início do estágio reprodutivo na semana Am8 (62 dias após semeadura), houve pouca variação nos valores médios dos índices, o que indica uma estabilização no crescimento das plantas.

O milho, de ciclo normal, emerge cerca de 5 dias após a semeadura e seu crescimento é observado através do número de folhas (estádio vegetativo). O crescimento cessa quando a floração ocorre, cerca de 65 dias após a emergência, neste período inicia-se, então, o estágio reprodutivo que se encerra com a maturação fisiológica do grão, por volta de 55 dias após a polinização (MAGALHÃES *et al.*, 2002). Esse comportamento reflete na estabilização, de todos os índices analisados, após a data Am8. Destacando que todas as cultivares de milho seguem o mesmo padrão de desenvolvimento, porém, o intervalo de tempo entre os estádios e número total de folhas podem variar entre as cultivares (MAGALHÃES *et al.*, 2002).

García-Martínez *et al.* (2020) reforçam o discutido até aqui, pois apresentam que os valores máximos de VARI são correspondentes aos valores máximos de cobertura do solo, relacionando-os com o início da fase reprodutiva, que neste experimento teve início próximo da oitava semana (62 dias após semeadura) e se manteve até o último dia de voo.

Como as plantas de milho apresentam uma expansão foliar natural e ocupam mais o solo, isso reflete em os valores dos índices vegetativos também crescerem. Porém, à medida que as plantas atingem o amadurecimento elas sofrem com o amarelecimento das folhas e apresentam abscisão foliar, então os valores dos índices tendem a diminuir também (ARAÚJO *et al.*, 2015). Entretanto, neste experimento não houve uma queda constante nos valores após o pendoamento do milho, mas sim uma variação. Isto pode ser explicado devido a influência do crescimento indeterminado da abóbora na média dos índices neste período. A abóbora tem um comportamento similar ao milho no início do ciclo, pois é o momento de emissão de novos

ramos e folhas. Porém, ao contrário da outra cultura, que cessa seu crescimento no período reprodutivo, a abóbora tem hábito de crescimento indeterminado. Com ramas vigorosas, seu hábito de crescimento é prostrado, rasteiro, indeterminado; durante seu desenvolvimento ocorrem simultaneamente, então, crescimento vegetativo, floração e frutificação (AMARO *et al.*, 2021). Assim, com a manutenção de folhas verdes no local, cobrindo o solo, há estabilização nos valores do índice e não queda do valor deles com o amarelecimento das folhas do milho.

Em experimento realizado por Gitelson *et al.* (2003), esses autores observaram que o índice VARI se apresenta como indicativo de fenologia para a cultura do milho, identificando então o período de crescimento e floração. O valor máximo do índice obtido por eles foi atingido com o fechamento do dossel, sendo que com o início da floração ocorre a alteração nos valores obtidos, pois a reflectância do dossel no espectro visível aumenta na faixa vermelha, o que ocasiona a diminuição da faixa verde (e assim também do valor calculado do VARI), ocasionada pelo amarelecimento e abscisão foliar.

Analizando os índices individualmente, o fNDVI e o VARI (figura 3) obtiveram valores próximos, tendo no período de máximo crescimento das plantas apresentado um valor próximo a 0,0, demonstrando que no início do seu crescimento houve grande influência da reflectância captada vinda do solo, correspondendo ao comprimento de onda referente ao vermelho. Hunt *et al.* (2005, *apud* MAGALHÃES; ROSSI, 2024) mencionam que o fNDVI demonstra sensibilidade ao solo exposto nos estágios iniciais, antes do fechamento da cobertura do dossel.

Segundo Magalhães e Rossi (2024), os índices fNDVI e VARI têm uma forte associação com a reflectância na faixa do verde. Em seu experimento, os índices demonstraram uma correlação mais significativa com o aumento do índice de área foliar, pois quando a cobertura vegetal é reduzida, a maior parte da reflectância captada pelos sensores provém do solo, apresentando assim valores negativos. À medida que a planta cresce e emite mais folhas, a reflectância vermelha tende a diminuir. Isso ocorre porque a contribuição do solo se reduz e a clorofila absorve mais luz vermelha, refletindo mais em um comprimento de onda referente ao verde. Nesse momento, esses índices apresentam maiores valores e maior correlação com o aumento da área foliar.

A radiação eletromagnética absorvida e refletida pelas plantas é influenciada pela fotossíntese e pelas propriedades da clorofila, pigmento responsável pela absorção de luz. A clorofila absorve radiação em toda região visível (400-700 nm) do espectro eletromagnético,

mas tem seu máximo nas faixas azul (400-500 nm) e vermelho (600-700 nm). A absorção nessas faixas fornece a energia necessária para os processos bioquímicos da fotossíntese, enquanto isso, as folhas refletem em maior quantidade nas faixas verde (500-600 nm) e infravermelho próximo - NIR (750-1300 nm), que são úteis para monitorar aspectos fisiológicos e a biomassa da vegetação (SHIRATSUCHI *et al.*, 2014). Índices de vegetação, como o NDVI, utilizam as diferenças de reflectância entre o vermelho e infravermelho próximo para estimar a quantidade de clorofila nas plantas, com valores positivos, próximo a 1, do NDVI indicando maior vegetação saudável (CRUSIOL *et al.*, 2024).

Para Silva *et al.* (2022), então, o grande número de pixels verde escuro na imagem resulta em altos valores do índice VARI, sendo possível fornecer informações sobre diversos parâmetros fisiológicos das plantas, incluindo concentração de nitrogênio nas folhas e o conteúdo de clorofila. Contudo, os índices que consideram a região espectral da borda vermelha e infravermelho apresentam uma maior sensibilidade de reflectância ao conteúdo de clorofila (GITELSON *et al.*, 2003; KAZEMI; PARMEHR, 2023) do que índices no espectro do visível.

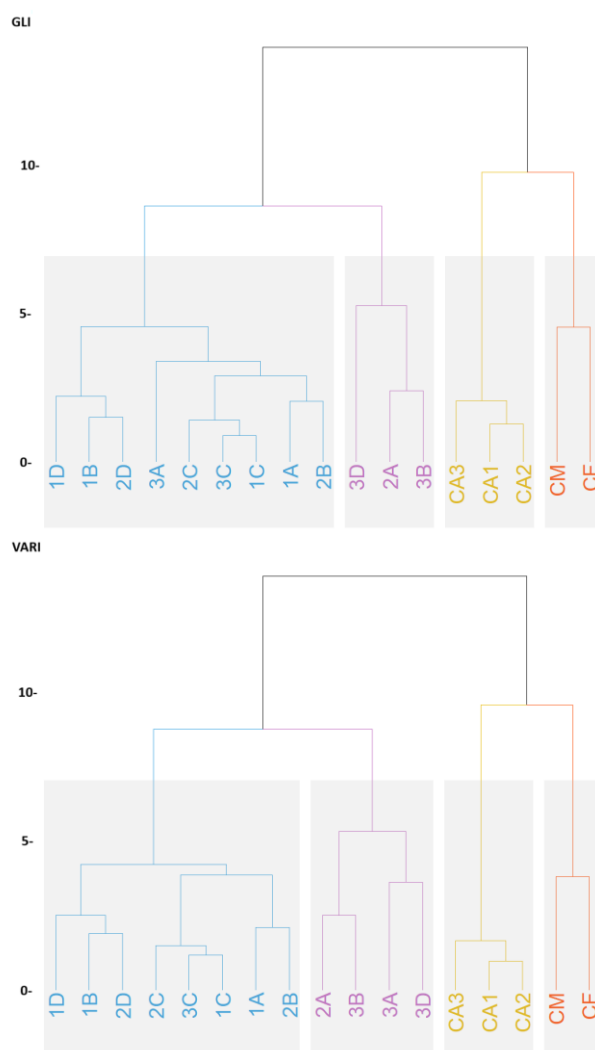
O índice GLI (figura 3) apresentou valores médios muito próximos a 0,0 no início do crescimento das plantas e valores positivos com aumento constante ao longo do ciclo. Kazemi e Parmehr (2023) em estudo com a cultura do arroz, mencionam que áreas com valores mais baixos de GLI indicaram que as plantas estavam em fase de crescimento, o que pode ser válido para o milho e a abóbora, visto que apresentam comportamento equivalente neste mesmo período.

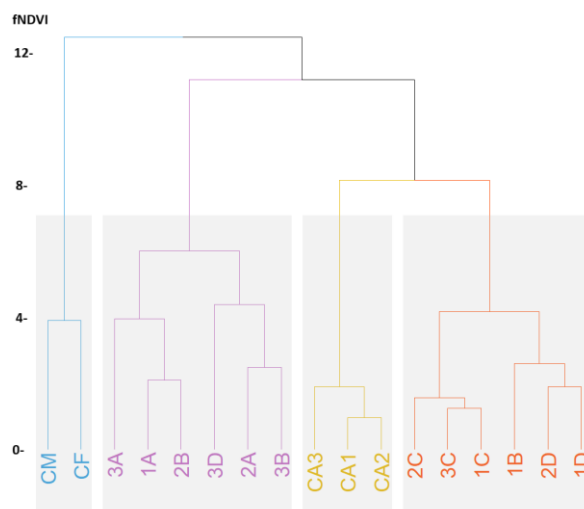
O GLI tem grande aplicação na distinção entre vegetação fotossinteticamente ativa e vegetação seca com exposição de solo. Ao analisar os valores, percebe-se que o índice GLI é mais sensível à vegetação verde. Isso pode ser explicado pela formulação do índice, que atribui um peso 2 à banda espectral do verde, em comparação com os pesos das bandas azul e vermelha, portanto, valores positivos do GLI indicam características associadas a folhas e caules verdes e aumento da cobertura vegetal (ANDRADE *et al.*, 2019).

Em um estudo com soja, Silva, Elias e Rosário (2022) observaram que o GLI demonstrou ser sensível à cobertura do solo, captando variações relacionadas à presença de biomassa vegetal. Esse comportamento foi identificado também na presente pesquisa, onde os valores do GLI aumentaram à medida que as culturas cresceram e o dossel foi se fechando. A

semelhança nos resultados sugere que o GLI pode ser útil na detecção de mudanças estruturais no dossel em diferentes espécies vegetais, permitindo um acompanhamento do desenvolvimento fenológico das culturas agrícolas (SILVA, ELIAS E ROSÁRIO, 2022).

Figura 4: Análise de *cluster* envolvendo os dados do índice de vegetação GLI, VARI e f NDVI das parcelas experimentais.





Fonte: Elaborado pelos autores

Para todos os índices, as parcelas de controle das diferentes abóboras (CA) se mantiveram agrupadas (Figura 4), bem como a parcela controle de milho (CM) se manteve em outro agrupamento separado. Utilizando os dados dos índices GLI e VARI as parcelas controle foram agrupadas de forma semelhante, as parcelas de controle das abóboras foram agrupadas em um *cluster* próximo ao *cluster* com as parcelas de controle do milho. Contudo, para o fNDVI, as abóboras solteiras estão mais semelhantes com outras parcelas e o controle de milho totalmente separado.

Nas parcelas controle, como não ocorre o consórcio, as plantas podem levar mais tempo para ocupar o solo, pois, em cultivos consorciados em geral, a capacidade de cobrir o solo ocorre mais rapidamente quando comparado a sistemas solteiros (FERREIRA *et al.*, 2014). Este pode ser um dos motivos para expressar este agrupamento, diferenciando o controle dos tratamentos 1, 2 e 3.

Na análise de *cluster* do GLI e VARI, todas as repetições do tratamento 1 (consórcio com moranga exposição) se mantiveram no mesmo *cluster*, em relação ao tratamento 2 (abóbora paulista) três repetições apresentaram semelhança, enquanto as do tratamento 3 (abóbora menina brasileira) apresentou duas repetições em dois agrupamentos diferentes para GLI e três repetições em um mesmo agrupamento para VARI.

Para o fNDVI o tratamento 1 e 3 apresentaram três repetições em agrupamento diferentes, enquanto o tratamento 2 se manteve com duas repetições em cada agrupamento junto

com os outros tratamentos. Uma característica em comum a todos os índices de vegetação foi a permanência do bloco C em um mesmo agrupamento, ligados diretamente entre si. Bem como, é notada similaridade entre as variedades da espécie *C. moschata* Duchesne. Para os três índices, as parcelas B3, D3 e A2 fazem parte do mesmo agrupamento, sendo acrescentado A3 na análise do índice VARI.

Através da observação das imagens RGB da área experimental, nota-se uma maior expressividade no tamanho da planta e folhas no monocultivo (CA1) da moranga exposição (*Cucurbita maxima* Duchesne ex Lam.), desde a data Am4 até Am10, posteriormente ocorre aumento de plantas espontâneas e não é possível a diferenciação visual entre os monocultivos de abóboras.

Nas parcelas com consórcio, D1 se destaca pela cobertura ocasionada pela mesma variedade, principalmente nas datas Am5, Am6 e Am7. Para todos os índices as parcelas D1, D2 e B1 se mantiveram próximas na análise dos agrupamentos, evidenciando semelhança entre as parcelas com a mesma variedade e relação do consórcio de moranga exposição com a abóbora paulista - D2 (*Cucurbita moschata* Duchesne). Contudo, o agrupamento de D1 e D2 pode ter influência da variação espacial da abóbora, fazendo com que ambas se desloquem para fora da parcela experimental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A RPA e o sensor RGB possibilitaram alta resolução das imagens, mesmo em uma área de cultivo pequena. Bem como, os índices de vegetação permitiram analisar diversos aspectos das características das culturas estudadas e sua interação no consórcio, evidenciando a funcionalidade desta ferramenta para monitoramento de culturas agrícolas.

O comportamento dos índices de vegetação GLI, VARI e fNDVI apresentaram padrões de cobertura vegetal e aspectos fisiológicos das plantas encontrados na literatura. Porém, com limitações devido à ausência da reflectância na faixa do infravermelho próximo (NIR), crucial para uma avaliação precisa da saúde vegetal.

Na análise de *cluster*, os cultivos solteiros se diferenciam do consórcio. No consórcio, não foi observado diferença significativa entre os tratamentos. Todavia, as variedades da mesma

espécie (tratamentos 2 e 3) obtiveram agrupamentos entre si em todos os índices, bem como as parcelas do bloco C, também se mantiveram agrupadas.

Por meio da observação das ortofotos, o tratamento 1 se diferencia pelo maior tamanho de plantas e folhas no monocultivo e em duas parcelas no consórcio.

Agradecimentos

Este trabalho teve financiamento do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar (CCA) - projeto FAI RTI-CCA. Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) — Processo 88887.691467/2022-00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTIERI, M. A.; FUNES-MONZOTE, F. R.; PETERSEN, P. “Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty”. **Agronomy for sustainable development**, v. 32, n. 1, p. 1-13, 2012.
- AMARO, G. B.; HANASHIRO, M. M.; PINHEIRO, J. B.; MADEIRA, N. R.; BORGES, R. M. E. **Recomendações técnicas para o cultivo de abóboras e morangas**. Circular Técnica 175. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2021.
- ANDRADE, R. *et al.* “Uso de veículo aéreo não tripulado (vant) no monitoramento dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho”. In: SILVA, H. C. da (Org.). Engenharia Sanitária e Ambiental. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.
- ARAÚJO, Glaucio L. *et al.* “Respostas espectrais e análise do índice de vegetação normalizado (NDVI) na cultura do milho irrigado”. In: **Seminário Científico do UNIFACIG**, n. 1, 2015. Manhuaçu, MG. Anais de resumo. 2015.
- CAMBRAIA FILHO, D. J. **Utilização de índices de vegetação baseados na porção visível do espectro eletromagnético para monitoramento de fitofisionomias do Cerrado**. 2019. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmicas, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília.
- CRUSIOL, Luís Guilherme Teixeira *et al.* **50 anos do NDVI: desmistificando o índice e ponderando sua utilização para o monitoramento da soja na era digital**. Londrina - PR: Embrapa Soja, 83 p., 2024.

- DARAMOLA, O. *et al.* “Assessing the geometric accuracy of UAV-based orthophotos”. **South African Journal of Geomatics**, v. 6, n. 3, p. 395-406, 2017.
- DJI. MATRICE 300 RTK: **Manual do Utilizador**. 2020.
- DU, L. *et al.* “Estimating Leaf Area Index of Maize Using UAV-Based Digital Imagery and Machine Learning Methods”. **Sci. Rep.** v. 12, n. 1, 2022.
- FERREIRA, E. A. *et al.* “Crescimento inicial da cultura da mandioca em sistema de policultivo”. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 3, p. 219-226, 2014.
- FONTEYNE, S. *et al.* “Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Mesoamerica”. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1115490, 2023.
- GARCÍA-MARTÍNEZ, H. *et al.* “Estimación de la fracción de cobertura de la vegetación en maíz (*Zea mays*) mediante imágenes digitales tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV)”. **Revista fitotecnica mexicana**, v. 43, n. 4, p. 399-409, 2020.
- GITELSON, A. A. *et al.* “Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction”. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, 2002.
- GITELSON, A. A. *et al.* “Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies”. **Geophysical research letters**, v. 30, n. 5, 2003.
- KAZEMI, F.; GHANBARI PARMEHR, E. “Evaluation of RGB vegetation indices derived from UAV images for rice crop growth monitoring. ISPRS Annals of the Photogrammetry”. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 10, p. 385-390, 2023.
- LI, W. *et al.* “A New Remote Sensing Service Mode for Agricultural Production and Management Based on Satellite–Air–Ground Spatiotemporal Monitoring”. **Agriculture**, v. 13, n. 11, p. 2063, 2023.
- LIU, Y. *et al.* “Remote-sensing estimation of potato above-ground biomass based on spectral and spatial features extracted from high-definition digital camera images”. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 198, p. 107089, 2022.
- LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. “Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat”. **Geocarto International**, v. 16, n. 1, p. 65–70, 2 mar. 2001.
- MACIEL, A.; VINHAS, L.; CÂMARA, G. “Algoritmos de clustering para separação de culturas agrícolas e tipos de uso e cobertura da Terra utilizando dados de sensoriamento

- remoto”. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa-PB. Anais de resumo. p. 4620-4627, 2015.
- MAGALHÃES, P. C. *et al.* **Fisiologia do milho**. Ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Embrapa, Circular Técnica 22, Sete Lagoas, MG, 2002.
- de MAGALHÃES, L.P.; ROSSI, F. “Use of Indices in RGB and Random Forest Regression to Measure the Leaf Area Index in Maize”. **Agronomy**, 14, 750, 2024.
- PIERRE, J. F. *et al.* “Maize legume intercropping systems in southern Mexico: A review of benefits and challenges”. **Ciência Rural**, v. 52, n. 11, p. e20210409, 2022.
- PUNIACH, E. *et al.* “Application of UAV-based orthomosaics for determination of horizontal displacement caused by underground mining”. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 174, p. 282-303, 2021.
- SAMECIMA JUNIOR, E. H. **Índice de vegetação por diferença normalizada e caracteres agronômicos em genótipos de milho**. 2018. Dissertação, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal-SP.
- SHIRATSUCHI, L. S. *et al.* “Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão”. In: BERNARDI, Alberto Carlos de Campos *et al.* (editores técnicos). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF : Embrapa, 596 p. 2014.
- SILVA, M. F. *et al.* “High-throughput phenotyping by RGB and multispectral imaging analysis of genotypes in sweet corn”. **Horticultura Brasileira**, v. 40, p. 092-098, 2022.
- SILVA, M. H.; ELIAS, A. R.; DO ROSÁRIO, L. L. “Análise da cultura da soja a partir de índices de vegetação (ExG–GLI–TGI–VEG) advindos de imagens RGB obtidas com ARP”. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 10, n. 2, p. 140-154, 2022.
- TUCKER, C. J. “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation”. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127–150, 1979.