

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA CAMPUS MONTE CARMELO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E INFORMAÇÕES
GEOESPACIAIS

LUANE ARAÚJO LIMA

COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA AÇÃO DE
DEFENSIVOS NA CULTURA DA MANDIOCA

MONTE CARMELO

2025

LUANE ARAÚJO LIMA

**COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA AÇÃO DE
DEFENSIVOS NA CULTURA DA MANDIOCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis.

MONTE CARMELO

2025

**COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA AÇÃO DE
DEFENSIVOS NA CULTURA DA MANDIOCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Monte Carmelo, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em: 20 de janeiro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis – Instituto de Geografia (UFU).

Profa. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli – Instituto de Biotecnologia (UFU).

Prof. Dr. Ricardo Vicente Ferreira – Departamento de Geografia (UFTM).

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis
Instituto de Geografia (UFU)
(Orientador)

MONTE CARMELO

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L732 2025	Lima, Luane Araújo, 1996- Comparação de índices de vegetação para avaliação da ação de defensivos na cultura da mandioca [recurso eletrônico] / Luane Araújo Lima. - 2025. Orientador: Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.29 Inclui bibliografia. 1. Agronomia. I. Gallis, Rodrigo Bezerra de Araújo, 1977-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais. III. Título. CDU: 631
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2: Gizele

Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais

Rodovia LMG 746, Km 01, s/nº, Bloco 1AMC, Sala 1A202, Monte Carmelo-MG, CEP 38.500-000
Telefone: (34) 3810-1033 - ppgaig@iciag.ufu.br

**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	20/01/2025	Hora de início:	14h	Hora de encerramento:	16:40h
Matrícula do Discente:	32212AIG006				
Nome do Discente:	Luane Araújo Lima				
Título do Trabalho:	Comparação de índices de vegetação para avaliação da ação de defensivos na cultura da mandioca				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento e aplicações de métodos em informações geoespaciais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Utilização de imagens multiespectrais na fitotecnia				

Reuniu-se na sala virtual, <https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/rodrigo-bezerra-de-araujo-gallis>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, assim composta: Professores Doutores: Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis (UFU), orientador da candidata; Ana Carolina Silva Siquieroli (UFU); e Ricardo Vicente Ferreira (UFTM).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/01/2025, às 17:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Vicente Ferreira, Usuário Externo**, em 21/01/2025, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Carolina Silva Siquieroli, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/01/2025, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6004266** e o código CRC **77A810FC**.

**“Acredite em si mesmo e em tudo
o que você é. Saiba que há algo
dentro de você que é maior do que
qualquer obstáculo.”**

(Christian D. Larson)

AGRADECIMENTOS

À Deus, que com a Sua benção, agradeço pela conclusão do mestrado. Surgiram momentos de desafios e de superações no percurso, mas não me faltou esperança, coragem, força, persistência, amor, sabedoria e saúde para enfrentar todos os instantes.

Aos meus pais Delma e Lucas, fundamentais em toda a minha vida, agradeço o amor incondicional, as palavras de encorajamento em dias difíceis, o apoio, o carinho, a paciência e a dedicação.

Ao meu companheiro Vandson, parceiro de todas as horas, pelo amor, risadas, paciência e incentivo de sempre ir em busca dos meus objetivos ao longo dessa jornada. Feliz por voce ter compartilhado essa etapa ao meu lado.

Aos meus avós, irmãos e tias, meu especial agradecimento, pelo suporte, apoio e compreensão, para que eu pudesse alcançar mais esse sonho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis o meu reconhecimento pela parceria e ajuda ao longo da graduação e no mestrado. Suas considerações sempre foram importantes, acreditando no meu potencial.

Ao professor Dr. Ricardo Luis Barbosa pelo suporte durante a realização do meu trabalho, sendo indispensável a sua presença. Obrigada pela disponibilidade, conhecimento e expertise para solucionar os desafios encontrados. Seus conselhos e incentivos foram importantes para a conclusão da minha pesquisa.

Aos membros da banca, Prof^a. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli e Dr. Ricardo Vicente Ferreira, por aceitarem o convite de participar e contribuir com esse trabalho.

Ao Ph.D. Filipe Inácio Matias agradeço por estar presente durante o exame de qualificação e de direcionar o estudo da melhor forma possível. Sua orientação, disponibilidade e compartilhamento do seu conhecimento pessoal e profissional foram essenciais.

À Embrapa Mandioca e Fruticultura de Cruz das Almas (BA), pelo apoio e colaboração oferecidos para o desenvolvimento do projeto. Em especial, a Reisane Teles Santiago, pela parceria e contribuição fundamentais, sendo suporte contínuo e na troca de conhecimentos no decorrer da pesquisa.

À instituição de ensino e apoio financeiro, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, por meio da qual foi possível buscar a excelência acadêmica, contribuindo com a minha pesquisa, no avanço do desenvolvimento científico no país.

RESUMO

A mandioca é uma cultura de grande importância nacional e internacional, sendo amplamente utilizada na alimentação humana e animal, além de servir como matéria-prima para diversas indústrias. O avanço das tecnologias na agricultura, como sensores remotos e drones, permite a análise precisa de variáveis essenciais das lavouras, otimizando o uso de insumos, aumentando a produtividade e promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável. A fenotipagem por imagem, por meio dos sensores no espectro do visível (RGB) e infravermelho próximo (IVP), com a utilização de ARP para obtenção da mesma, facilita o processo de captura das imagens, sendo uma importante plataforma de baixo custo e de alta resolução. Dessa maneira, busca-se extrair índices vegetativos na cultura da mandioca e, posteriormente, estudar os pigmentos dos cultivares. Para isso, foi utilizada a ARP Mavic 3M da DJI e a ferramenta *FieldImageR*. Assim, foram gerados índices de vegetação para verificar a correlação de cada um com as características fenotípicas da mandioca. Os resultados alcançados reforçam a relevância de abordagens integradas, que combinam ferramentas digitais, avaliações visuais e conhecimentos agronômicos, visando ao manejo sustentável da mandioca e à otimização do uso de herbicidas na cultura.

Palavras-chave: Mandioca; Fenotipagem por Imagem; Herbicidas; Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Cassava is a crop of great national and international importance, being widely used in human and animal food, in addition to serving as a raw material for several industries. Advances in technologies in agriculture, such as remote sensors and drones, allow for the precise analysis of essential crop variables, optimizing the use of inputs, increasing productivity, and promoting more efficient and sustainable management. Image phenotyping, using sensors in the visible spectrum (RGB) and near-infrared (NIR) using UAV to obtain the same, facilitates the image capture process, being an important low-cost and high-resolution platform. In this way, the aim is to extract vegetative indices in cassava crops and, subsequently study the pigments of the cultivars. For this, the DJI Mavic 3M UAV and the FieldImageR tool were used. Thus, vegetation indices were generated to verify the correlation of each one with the phenotypic characteristics of cassava. The results reinforce the relevance of integrated approaches that combine digital tools, visual assessments, and agronomic knowledge, aiming at the sustainable management of cassava and the optimization of the use of herbicides in the crop.

Keywords: Cassava; Image Phenotyping; Herbicides; Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Relação ao espectro eletromagnético com os comprimentos de ondas.	22
Figura 2.	Comportamento espectral de objetos nas regiões do espectro eletromagnético.	23
Figura 3.	Mapa de localização experimental em Cruz das Almas (BA).	27
Figura 4.	Notas atribuídas por meio da fenotipagem digital de imagens pela melhorista.	33
Figura 5.	Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10,13,16,30DAA) para o NDVI.	34
Figura 6.	Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10,13,16,30DAA) para o NDRE.	36
Figura 7.	Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10,13,16,30DAA) para o CIRE.	37
Figura 8.	Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10,13,16,30DAA) para o NGRDI.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Escala visual quanto a tolerância aos herbicidas.	30
Tabela 2.	Índices de vegetação e sensibilidade utilizados na pesquisa: RGB e Multispectral.	31
Tabela 3.	Diferenças significativas para o NDVI.	34
Tabela 4.	Diferenças significativas para o NDRE.	35
Tabela 5.	Diferenças significativas para o CIRE.	37
Tabela 6.	Diferenças significativas para o NGRDI.	39

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
LSPA	Levantamento Sistemático de Produção Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
cm	Unidade de medida: centímetros
DAP	Dias após o plantio
°C	Escala para medição de temperatura: graus celsius
%	Símbolo matemático: porcentagem
km/h	Unidade de medida - velocidade: quilômetros por hora
nº	Número
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ACCase	Enzima acetil-coenzima-A carboxilase
ADAPAR	Agência de Defesa Agropecuária do Paraná
AGROFIT	Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ARPs	Aeronaves Remotamente Pilotadas
RGB	Bandas do espectro visível (RGB)
Red	Inglês: Vermelho
Green	Inglês: Verde
Blue	Inglês: Azul
ISPRS	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
REM	Radiação Eletromagnética
nm	Unidade de medida – comprimento de ondas: nanômetros
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
IVs	Índices Vegetativos
NDRE	<i>Normalized Difference RedEdge</i>

NIR	<i>Near Infrared</i>
Red Edge	Inglês: Borda do vermelho
CIRE	<i>Chlorophyll index – RedEdge</i>
NGRDI	<i>Normalized Green Red Difference Index</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UFRB	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
BA	Bahia
m	Unidade de medida em comprimento: metros
DBA	Delineamento de Blocos Aumentados
MP	Megapixels
ha⁻¹	Unidade de medida – área: hectares
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
cm/pixel	Resolução espacial das imagens – centímetros por pixel
mm	Unidade de medida em comprimento: milímetros
3D	Formato tridimensional
MDS	Modelo digital de superfície
MDT	Modelo digital do terreno
SIG	Sistema de Informações Geográficas
HUE	<i>Overall Hue Index</i>
gl	Estatística: graus de liberdade
p-value	Significância estatística – análise de correlação
ANOVA	Análise de variância
≤	Símbolo matemático: menor ou igual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral.....	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1	Sensoriamento Remoto e Fotogrametria	21
3.2	Índices vegetativos	24
3.3	Fenotipagem por imagem.....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Área de estudo, delineamento, acesso e herbicidas aplicados.	27
4.2	Planejamento e Levantamento Aerofotogramétrico.....	29
4.3	Fenotipagem por Imagem: campo e digital	29
4.4	Processamento Fotogramético.....	30
4.5	Extração dos Índices Vegetativos	31
4.6	Análise estatística	32
5	RESULTADOS	33
6	DISCUSSÕES	41
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a mandioca, em suas formas de raiz, farinha ou fécula, é consumida em todo o mundo, destacando-se nas regiões tropicais. Essa ampla presença deve-se à sua grande adaptabilidade às condições climáticas e aos diversos tipos de solo (CONAB, 2017).

Segundo o Levantamento Sistemático de Produção Agropecuária (LSPA) realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2023, a produção brasileira de raiz de mandioca foi estimada em 19,13 milhões de toneladas colhidas. Importante destacar que a distribuição territorial da cultura abrange dois estados: região norte (Pará) e no Sul (Paraná). As explicações condizem que na primeira região existe a maior área cultivada da cultura em produção familiar e na segunda, o nível de investimento tecnológico é maior, ocasionando maior produtividade (CONAB, 2024).

A mandioca, em relação ao seu crescimento e desenvolvimento, possui um ciclo de longa duração, caracterizado por alternâncias entre períodos de evolução vegetativa e de acúmulo de reservas nas raízes. Também podem ocorrer períodos de dormência devido à variações climáticas ou à escassez prolongada de água. Além disso, sua propagação pode ocorrer por meio de manivas (ramas) ou sementes, sendo a multiplicação por ramas especialmente importante em programas de melhoramento genético da cultura (SOUZA *et al.*, 2006).

Segundo Júnior e Alves (2014), as manivas devem ser extraídas de plantas vigorosas e saudáveis para prevenir a disseminação de doenças e pragas, garantido a qualidade da cultura. É recomendado que as plantas retiradas no período entre 10 a 12 meses de ciclo, e as manivas, devem ser cortadas com aproximadamente 20 cm de comprimento. Outro aspecto importante é o armazenamento das ramas, que deve ocorrer em locais arejados, sombreados e com umidade moderada, visando melhor conservação e evitando perdas causadas pelo processo de desidratação

Deve-se dar atenção à escolha da área e ao preparo do solo para o cultivo de mandioca. Embora a cultura possa ser implantada em diversos tipos de solo, recomenda-se o uso em solos arenosos. Deve ser priorizada a correção dos mesmos por meio de fertilizantes, devido à falta de nutrientes importantes, como os macronutrientes e micronutrientes essenciais para a nutrição das plantas: fósforo, cálcio, magnésio, potássio e zinco. No entanto, é fundamental que os solos sejam bem drenados, profundos e descompactados, para permitir o adequado enraizamento, evitando a decomposição e deformidades nas raízes. No preparo do solo, o ideal é aplicar corretivos antes da etapa de gradagem, seguida pela incorporação de matéria orgânica na área. Posteriormente, realiza-se a gradagem cruzada para garantir um solo uniforme e adequado ao plantio (LIRA *et al.*, 2010).

Segundo SOUZA *et al.* (2006) no processo de desenvolvimento da mandioca, várias etapas se sucedem, mas a duração de cada ciclo é afetada por uma série de variáveis a serem consideradas, incluindo condições climáticas e práticas de manejo. De modo geral, esses ciclos são divididos em dias após o plantio (DAP). São eles:

- emergência (5 a 15 DAP): brotação das primeiras raízes e surgimento de pequenas folhas;
- início do desenvolvimento foliar e formação do sistema radicular (15 a 90 DAP): o processo fotossintético inicia-se para o crescimento da cultura e desenvolvimento de novas raízes fibrosas, que começam a alcançar o solo para penetração e absorção de nutrientes e água;
- desenvolvimento de ramos e folhas com abertura das copas (90 a 180 DAP);
- translocação de carboidratos para as raízes (180 a 300 DAP): aumento da senescência e queda foliar;
- dormência (300 a 360 DAP): redução na produção de folhas, crescimento vegetativo dos ramos torna-se estagnados. Completa-se o ciclo de 12 meses, o amido é translocado para a raiz, até obter a máxima produção de matéria seca.

O uso de herbicidas na cultura da mandioca pode ser realizado em diferentes estágios de desenvolvimento e em áreas com a presença de plantas daninhas; no entanto, devido à resistência da mandioca a alguns produtos, as aplicações são feitas em períodos específicos, como pré-plantio, pré-emergente e pós-emergente (EMBRAPA, 2006).

Os herbicidas são essenciais para o manejo de cultura devido à presença de plantas daninhas, que competem com a mandioca por recursos como espaço, nutrientes, água e luz, resultando na redução da produtividade. Além disso, o controle das daninhas com herbicidas contribui para o aumento dos custos de manutenção na área plantada. A Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) realiza pesquisas periódicas com o objetivo de monitorar a resistência de plantas daninhas aos herbicidas, a fim de aprimorar as estratégias de controle e garantir a sustentabilidade do uso desses produtos na agricultura (ADEGAS *et al.*, 2017).

Existem diversos estudos sobre as variedades e tolerâncias da mandioca aos herbicidas. No entanto, ainda há uma lacuna de informações técnicas e específicas no manejo de plantas daninhas para essa cultura. Neste estudo, observou-se que alguns cultivares demonstram tolerância aos herbicidas devido às variações nas características presentes em cada genótipo, o que pode influenciar a resposta da planta ao controle químico. (SANTOS *et al.*, 2011).

A aplicação de herbicidas na cultura da mandioca pode ocorrer em diferentes momentos do ciclo produtivo. No pré-plantio, o herbicida é incorporado ao solo para reduzir a população de plantas

daninhas de ciclo longo, podendo também ser agregado ao solo para minimizar perdas por volatilidade e fotodecomposição, garantindo maior solubilidade e eficácia do produto. Na pré-emergência, a aplicação ocorre após o plantio e antes da emergência tanto da cultura quanto das plantas daninhas. Já na pós-emergência, o herbicida é aplicado em toda a área cultivada, exigindo atenção à seletividade da cultura, levando em consideração fatores como o estágio de desenvolvimento da mandioca, a sua genética, o herbicida mais adequado, as condições ambientais, além da regulação e calibração dos equipamentos (SOUZA *et al.*, 2006).

Os métodos de manutenção e manejo de plantas daninhas, incluindo abordagens mecânicas, culturais, preventivas, químicas e integradas, desempenham um papel essencial na preservação da qualidade e produtividade das lavouras. Em aplicações pós-emergentes, o clima deve estar estável para garantir a absorção e translocação do herbicida, com temperaturas estimadas entre 20 a 30°C, umidade relativa do ar entre 70 a 90% e ventos com velocidade até 10 km/h. Além disso, não se deve aplicar em plantas suscetíveis, ou seja, em plantas estressadas, nem em condições climáticas adversas, como temporais, pois isso pode diminuir a efetividade do produto e causar prejuízos à planta (AGOSTINETTO *et al.*, 2015).

Na fase de pós-emergência para a cultura da mandioca, existe apenas o registro do herbicida cletoxim nortox no MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), sob o nº 12217 (BRASIL, 2011). Este herbicida pertence ao grupo A e possui mecanismo de ação ACCase (Herbicidas inibidores da enzima acetil-coenzima-A carboxilase) na classe herbicida sistêmico e altamente seletivo (EMBRAPA, 2004) (ADAPAR, 2022).

De acordo o Comitê de Ação a Resistência aos Herbicidas (HRAC) e Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Agricultura (MAPA), os herbicidas são divididos de acordo com ingrediente ativo, sendo adaptado de Oliveira (2020) (<https://maxweeds.rbind.io/post/chart/second.png>).

- Mesotriona – inibidor de HPPD (hidroxifenil-piruvato-dioxigenase);
- S-Metolaclo – inibe síntese de AGCML (Ácidos Graxos de Cadeia Muito Longa);
- Cloransulam-metílico – inibidor de ALS (acetolactato sintase).

O mecanismo de ação do Mesotriona afeta a biossíntese de carotenóide (falta de pigmento – folhas brancas e perda de clorofila). O S-metolaclo inibe ácidos graxos de cadeia muito longa, biossíntese ácida, responsáveis manutenção e estrutura celular e armazenamento de energia (retardo no crescimento, clorose ou deformidades nas folhas, estresse hídrico, desidratação e até morte). E o Cloransulam-metílico inibe aminoácidos de cadeia ramificada na produção de ácido pela enzima ALS (acetolactato sintase) e, provoca alteração na biossíntese de aminoácidos de cadeia ramificada (prejudica crescimento, clorose nas folhas, alteração no pH e planta mais suscetível a estresse e doenças) (SHANER, 2014).

Ao final do ciclo produtivo, a planta pode apresentar sinais de recuperação, como a rebrotação, com o surgimento de novas folhas e ausência de sintomas visuais causados pela ação do herbicida. Dessa forma, a seletividade dos herbicidas dependem também de variáveis fisiológicas da planta, como o mecanismo de ação do herbicida, a quantidade de biomassa, o crescimento, o estresse sofrido, as altas temperaturas e a época de aplicação (FERREIRA *et al.*, 2015).

Na colheita, as raízes da planta, ou seja, as matérias secas devem ser retiradas entre o oitavo e o vigésimo quarto mês. No entanto, são notáveis variações na produtividades e nas proporções de amidos, dependendo do período de arranque, o que afeta o rendimento final. A influência da altura da planta em relação à época de colheita foi observada da seguinte forma: as raízes colhidas aos 17 meses após plantio apresentaram maior resistência ao apodrecimento, quando comparadas às colhidas aos 14 e 18 meses (TAKAHASHI e GONÇALO, 2005) (VÍTOR *et al.*, 2015).

Por meio de estudos voltados para o melhoramento da mandioca, foi possível desenvolver variedades genéticas com resistências a fatores bióticos e abióticos, além de alto valor agregado. Pesquisas sobre os tipos de amidos nos germoplasmas contribuíram para o aumento da qualidade dos produtos e alimentos derivados da mandioca, com melhorias também no caráter nutricional, visando tanto a venda quanto o consumo (VALLE e LORENZI, 2014).

Na cultura da mandioca, ocorre a seleção por meio de técnicas naturais, que envolvem a diversidade genética presente nos bancos de germoplasmas em todo o mundo. Programas de melhoramento genético são voltados para estudos sobre: resistência à pragas e doenças, desenvolvimento de cultivares com maiores valores protéicos, questões relacionadas à toxicidade das raízes, seleção de variedades mais adequadas para as indústrias e consumo, além de buscar melhor rendimento nas raízes e, conseqüentemente, maior produtividade (LARA *et al.*, 2008).

As ARPs (Aeronaves Remotamente Pilotadas) são ferramentas importantes na agricultura, sendo utilizadas em diversas funcionalidades como: monitoramento de culturas, pulverizações, mapeamentos e detecção de doenças nas plantas. A adoção desses equipamentos pode contribuir para o desenvolvimento e a precisão nas atividades agrícolas, além de auxiliar na redução dos impactos ambientais causados pelas práticas convencionais (LIU *et al.*, 2021).

A utilização de ARP para a agricultura é interessante, oferece diversos benefícios: imagens de alta resolução, maior eficiência no controle e monitoramento de culturas, auxílio na tomada de decisões para detecção de problemas, redução de custos na manutenção da área plantada, e, conseqüentemente, aumento da produtividade. No entanto, existem alguns desafios do emprego das ARPs como: algumas áreas com falta de cobertura de internet, condições climáticas adversas (chuvas e ventanias), necessidade de experiência operacional com o equipamento e o conhecimento técnico adequado para

maximizar seu uso (SATAPATHY, ANSHUMAN e KRUPARANI, 2024).

Existem diversas plataformas para fenotipagem e duas metodologias mais comuns para aquisição de informações. São câmeras digitais RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) (região visível do espectro) e câmeras multi/hiperespectrais (região do infravermelho próximo). A partir dessas imagens, é possível observar características fenótípicas das plantas na região visível: altura, área foliar, crescimento e biomassa. Já na região do infravermelho próximo podem ser analisados parâmetros como clorofila, carotenóides, pigmentos, índices vegetativos, teor de água, biomassa e nutrientes (SOUSA *et al.*, 2015).

Diversos estudos apresentaram técnicas modernas de fenotipagem a partir de utilização de imagens aéreas digitais para diversas culturas, visando redução de custos, aumento da qualidade entre os parâmetros. Tendo em vista que o sensoriamento remoto apresenta uma vasta gama de ferramentas de processamentos digitais de imagens e sensores remotos de pequeno porte e baixo custo, estão sendo utilizados para diversos estudos na agricultura. Com base nessa premissa, a hipótese desse estudo baseia-se no seguinte questionamento: é possível avaliar a tolerância de cultivares de mandioca após a aplicação de três herbicidas (Mesotriona, S-Metolacolor e Cloransulam-metílico) na fase de pós-emergência da cultura, por meio do vínculo entre amostras obtidas *in situ* e dados de imagens aéreas digitais?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a tolerância de cultivares de mandioca após a aplicação de três herbicidas (Mesotriona - callisto, S-Metolacolor - dual e Cloransulam-metílico - pacto) na fase de pós-emergência da cultura, por meio da utilização de diferentes índices de vegetação, obtidos a partir de imagens capturadas por câmaras no espectro visível e multiespectral a bordo de uma ARP.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar as potencialidades das imagens aéreas digitais para aplicações em estudos de seleção de cultivares de mandioca e auxílio na tomada de decisão.
- Estabelecer quais os melhores índices vegetativos do espectro visível e infravermelho da cultura da mandioca utilizando sensores de baixo custo nas imagens de cultivares de mandioca após a aplicação de três herbicidas (Mesotriona, S-Metolacolor e Cloransulam-metílico) na fase de pós-emergência da cultura.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sensoriamento Remoto e Fotogrametria

O Sensoriamento Remoto e Fotogrametria envolvem a arte, ciência e tecnologia de obter informações precisas a partir de sistemas de imageamento ou demais sensores. Esses processos permitem captar, medir, analisar e representar dados sobre a Terra e outros objetos e fenômenos físicos (ISPRS, 1979).

A fotogrametria é subdividida em aérea/aerofotogrametria (utilizam-se câmeras em aeronaves para captar imagens do terreno); terrestre (imagens são obtidas de uma posição fixa ao solo); espacial (imagens extraterrestres e suas medições, fixa-se a câmera na lua, terra, planeta ou satélites); e curta distância (devido a proximidade da câmara com o objeto que será capturado) (TOMASELLI et al., 1999).

Enquanto a fotogrametria tradicional utiliza imagens aéreas ou terrestres para obter medições detalhadas, o sensoriamento remoto amplia essa abordagem ao incorporar dados de sensores que capturam informações em diversos espectros eletromagnéticos. Esse método proporciona uma visão mais abrangente e detalhada da superfície terrestre, permitindo uma análise mais completa e precisa das características e variáveis do ambiente (MITCHELL, 2019).

A fotogrametria com ARP trouxe uma revolução para a coleta de dados geoespaciais, ao introduzir um método altamente eficiente e econômico para a captura de grandes áreas. Esses equipamentos conseguem capturar uma densa série de imagens aéreas, que são então processadas para gerar modelos tridimensionais e ortofotos, com um nível de detalhe excepcionalmente alto. Esse avanço permite uma precisão e um nível de informação que eram praticamente inacessíveis com as tecnologias anteriores (SMITH, 2021).

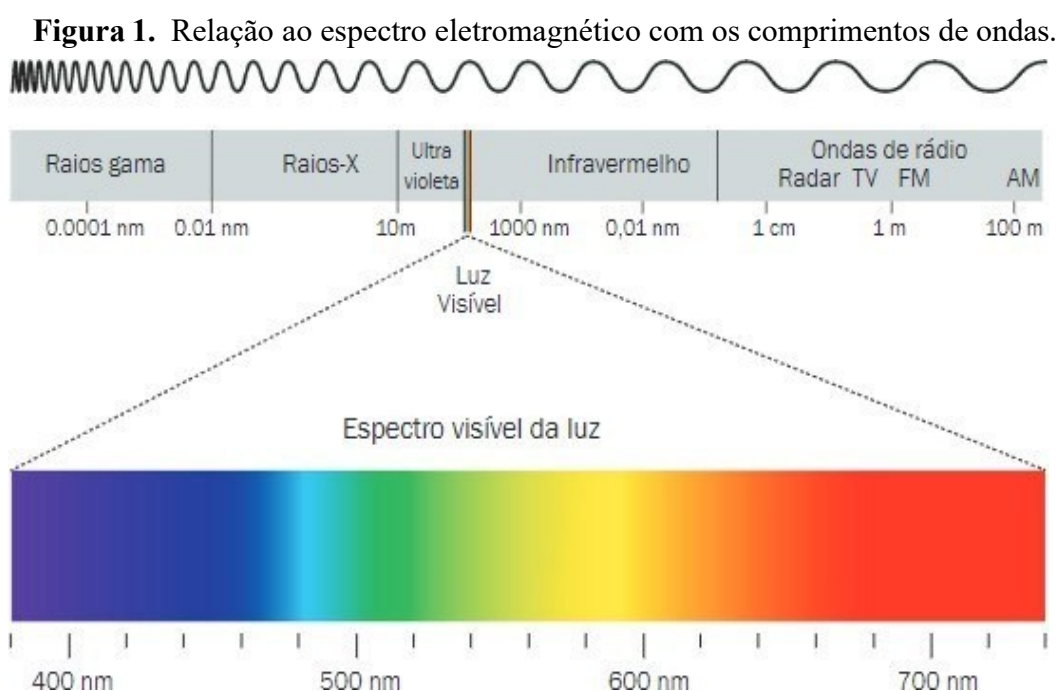
A diferença no número de imagens obtidas com câmeras métricas tradicionais em comparação com ARP justifica o uso de câmeras não métricas de pequeno formato. Enquanto câmeras métricas oferecem maior precisão com menos fotos, os equipamentos aéreos com câmeras não métricas capturam uma maior quantidade de imagens, proporcionando uma cobertura mais ampla e densa, a um custo e complexidade menores. Assim, câmeras não métricas são preferidas para obter grandes volumes de imagens de forma mais econômica e eficiente, apesar da menor precisão (SILVA et al., 2022).

Para garantir a melhor qualidade no imageamento de terrenos, é recomendável que o eixo óptico da câmera esteja alinhado perpendicularmente ao plano do terreno, ou seja, posicionado no NADIR. Esta orientação vertical maximiza a precisão na captura de imagens, minimizando distorções e assegurando que as medidas obtidas sejam mais fiéis à realidade (SILVA et al., 2022).

ARP são utilizadas para obtenção de imagens de alta resolução espacial e baixo custo. Esses equipamentos, possuem a capacidade de capturar as imagens exatamente no momento ideal da cultura e realizam-se índices vegetativos em culturas para detectar vegetações (TORRES-SANCHEZ et al., 2015).

ARPs com câmeras de alta-definição e sensores avançados estão transformando a fotogrametria ao permitir a criação de modelos digitais de elevação e ortofotos de alta qualidade. Esses dispositivos aéreos oferecem uma abordagem mais ágil e acessível em comparação aos métodos tradicionais, otimizando a precisão dos dados, o tempo e o custo envolvido (MARTINEZ, 2023).

Por meio da Figura 1, tem-se a relação quanto ao comprimento de onda no espectro eletromagnético nas regiões do mesmo (raios gama, raios-x, ultravioleta, visível, infravermelho e ondas de rádio) de Furian (2016). No espectro visível a luz, as faixas de cores têm comprimentos de onda determinadas da seguinte forma: faixa azul (estende aproximadamente de 0,35 a 0,50 nm), faixa verde (no intervalo de 0,50 a 0,62nm); e na vermelho (entre 0,32 a 0,70 nm).



Fonte: Furian (2016).

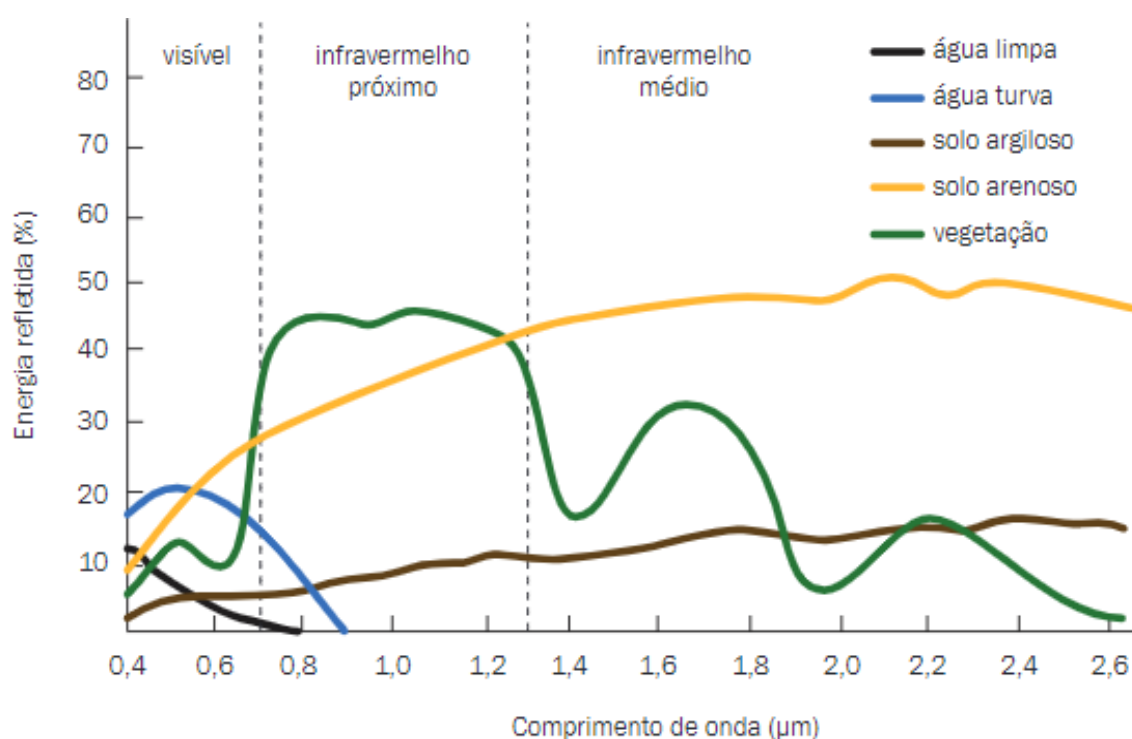
Os sensores capturam, por meio de imagens, a energia refletida ou emitida pelos objetos na superfície da terra. As informações recebidas por meio da radiação eletromagnética (REM) são compostas por variações de comprimentos de ondas, que são representadas por bandas ou em regiões do espectro. O espectro visível é composto pelo azul, verde e vermelho (400 nm a 700 nm). Já as demais partes são invisíveis a olho humano, e, após essas faixas, tem-se a região do infravermelho (1000 nm a 0,01 nm) (STEFFEN, s.d).

O Sensoriamento Remoto é uma técnica encontrada para observar a ação fenológica da cultura, por meio do comportamento espectral nas imagens. Então, a partir de diferentes padrões, são vistos em funções de qual cultura, cultivares, época de plantio, período de vigor vegetativo e colheita (FORMAGGIO E SANCHES, 2017).

A captura de imagens em várias bandas espectrais simultaneamente é a principal característica dos sensores. A resolução espectral de imagens de sensoriameto remoto são definidas por meio de três parâmetros: bandas do sensor, largura da banda no comprimento de onda e em qual banda encontra-se no espectro eletromagnético (MENESES E ALMEIDA, 2012).

De acordo com FLORENZANO (2011), o comportamento espectral de objetos estão representados na Figura 2, onde existe a relação entre regiões do espectro eletromagnético (visível, infravermelho próximo e médio) e seus respectivos comprimentos de ondas (nm) com energia refletida (%), e alguns elementos, como água (limpa e turva), solo (argiloso e arenoso) e presença de vegetação. As curvas dos objetos (água limpa, água turva, solo argiloso, solo arenoso e vegetação) na região do visível estão próximas entre si; assim os objetos são parecidos visualmente. No entanto o infravermelho possui uma distinção entre os objetos, onde eles possuem características diferentes nessa determinada faixa do espectro infravermelho (próximo e médio).

Figura 2. Comportamento espectral de objetos nas regiões do espectro eletromagnético.



Fonte: Florenzano (2011).

3.2 Índices vegetativos

No espectro da região visível (400 nm a 700 nm), a radiação eletromagnética é absorvida pelas folhas. No infravermelho próximo (700 nm a 1300 nm), ocorre maior reflexão devido à estrutura interna das folhas. Já no infravermelho de ondas curtas (1300 nm a 2500 nm), predomina a absorção, influenciada principalmente pelo teor de umidade presente no interior das folhas (FORMAGGIO E SANCHES, 2017).

O princípio da divisão de bandas é na criação de índices de vegetações (IVs), em que o mesmo realça as variações na cobertura vegetal. Existem diversos índices, um dos mais utilizado é o NDVI e variam entre -1 a 1. Ele é proporcional à biomassa da planta, ou seja, área foliar, porcentagem de cobertura do solo e estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (MENESES E ALMEIDA, 2012).

Por meio de operações aritméticas, com informações espectrais da radiação refletida pela vegetação, são calculados os IVs. Utilizam-se operações para amplificar as diferenças espectrais entre as diversas classes de cobertura vegetal. Dessa maneira, a partir disso são detectados vários tipos de vegetação e estado de saúde da planta (TORRES-SANCHEZ et al., 2015).

Os índices vegetativos são amplamente empregado para monitorar o teor de clorofila e carotenoides, avaliar o vigor vegetativo, e detectar a presença de doenças, pragas e estresse hídrico nas plantas (GARCÍA-HARO et al., 2018).

Os IVs são fundamentais na análise de várias características das plantas. Eles ajudam a avaliar o teor de clorofila e carotenoides, que são indicadores importantes da saúde e da fotossíntese da planta. Além disso, esses índices fornecem informações sobre o vigor vegetativo, permitindo identificar o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Também são úteis na detecção de doenças e pragas, pois alterações nos índices podem sinalizar problemas na planta. Finalmente, esses índices auxiliam na identificação de condições de estresse hídrico, ajudando a monitorar e gerenciar a irrigação de maneira mais eficaz (MARTIN et al., 2020).

No FieldImageR é possível analisar ortomosaicos gerados após o processamento fotogramétrico, nos quais possuem funções como visualização da imagem (RGB/Multiespectral), recorte e rotação, remoção de solo, construção das parcelas, extração de características de cada parcela quanto aos comprimentos de ondas e índices de vegetação, contagem de plantas, porcentagem da área e altura da planta (MATIAS et al., 2020).

Os índices vegetativos, são calculados a partir de operações matemáticas entre as diferentes bandas espectrais das imagens obtidas por câmeras multispectrais ou RGB. Apesar do FieldImageR possuir 21 índices vegetativos e dentre esses, 12 para a detecção de clorofila, foram escolhidos apenas quatro índices

para mensurar e avaliar a resposta espectral com a aplicação dos herbicidas, para simplificar a análise.

Foram usados os seguintes IVs para as câmeras multiespectrais (NDVI, NDRE e CIRE) e RGB - visível (NGRDI).

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), Índice de Vegetação de Diferença Normalizada foi proposto por *Rouse et al.* (1973), em que são utilizados os valores de reflectância na faixa do vermelho (*Red*) e infravermelho próximo.

NDVI, oferecem informações valiosas sobre a saúde das plantas, possibilitando a avaliação de parâmetros como o teor de clorofila, carotenoides, vigor vegetativo e as condições de estresse hídrico (TUCKER, 1979).

NDVI é um dos índices de vegetação mais amplamente empregados, fornecendo uma métrica confiável para avaliar a saúde da vegetação e identificar áreas com diferentes condições de cobertura (HUETE et al., 1998).

NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*), Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha criado por *Gitelson and Merzlyak* (1994), as variáveis estão determinadas pelos valores da reflectância na faixa do infravermelho próximo (NIR) e da borda vermelha (*RedEdge*) - entre o vermelho e o infravermelho próximo (690 a 750 nm).

NDRE é um índice valioso para estimar o teor de clorofila em culturas, proporcionando uma avaliação mais precisa da saúde das plantas, especialmente durante os estágios avançados de crescimento (GARCÍA-HARO et al., 2016).

NDRE é amplamente empregado na avaliação do estresse das plantas devido à sua sensibilidade a variações na estrutura da folhagem e no teor de clorofila. Essa característica torna-o uma ferramenta altamente eficaz para estudos sobre estresse vegetal (MATHISEN et al., 2019).

CIRE (*Chlorophyll index – RedEdge*), Índice de Clorofila – Borda vermelha, proposto por *Gitelson et al.* (2003), sendo os valores de reflectâncias referem-se as bandas: infravermelho próximo (NIR) e a borda do vermelho (*Red Edge*).

O CIRE é uma ferramenta utilizada para avaliar a concentração de clorofila nas folhas das plantas, possibilitando a estimativa da saúde da vegetação. Além disso, o índice permite monitorar o estado das culturas e identificar deficiências nutricionais (CLAROS, 2023).

NGRDI (*Normalized Green Red Difference Index*), Índice de Diferença do Verde e do Vermelho Normalizado desenvolvido por *Tucker* (1979). São usadas as reflectâncias das faixas: banda do verde (*Green – G*) e banda do vermelho (*Red – R*).

O NGRDI pode ser utilizado como um indicador de crescimento e desenvolvimento de plantas, fundamentado no estudo de Kanemasu (1974), que destacou o potencial das faixas espectrais do verde e

do vermelho. Além disso, seu uso foi ampliado para estimar a fração de vegetação, a biomassa e como uma ferramenta auxiliar na análise fenológica das plantas (AGNA, 2021).

3.3 Fenotipagem por imagem

A fenotipagem por imagem tem ganhado destaque no cenário atual devido à sua inovação e praticidade na obtenção de parâmetros como vigor vegetativo, medição de pigmentos e avaliação do crescimento de cultivares, entre outros. Uma de suas principais vantagens é a capacidade de realizar medições indiretas, sem a necessidade de remover as plantas do campo experimental, preservando o ambiente e facilitando o monitoramento contínuo (EMBRAPA, 2014).

A utilização de imagens para fenotipagem permite uma análise ágil e direta dos experimentos, sem causar interferências negativas nas amostras. Isso proporciona vantagens significativas e uma maior quantidade de informações ao melhorista, facilitando a avaliação e o aprimoramento das cultivares (PEIXOTO, 2020).

Na técnica de fenotipagem utilizando imagens, são aplicados métodos especializados para obter dados quantitativos sobre diversos aspectos das plantas. Esses métodos permitem a análise detalhada do crescimento das plantas, sua produtividade, e a avaliação dos estresses bióticos (como doenças e pragas) e abióticos (como condições climáticas adversas e deficiências nutricionais). A tecnologia de imagem facilita a captura e o processamento dessas informações de maneira precisa e abrangente, contribuindo para uma compreensão mais profunda das condições e desempenho das cultivares (LI et al., 2014).

O uso de ARPs na fenotipagem das plantas proporciona uma identificação mais eficaz dos mecanismos de resposta delas a estresses bióticos e abióticos, bem como a aspectos relacionados ao rendimento. Esses dispositivos permitem a captura de imagens com alta resolução e oferecem agilidade no processo de monitoramento, possibilitando uma análise detalhada e rápida das condições das plantas. A capacidade de obter imagens precisas e em tempo real torna os ARPs ferramentas valiosas para a avaliação de diferentes parâmetros relacionados à saúde e ao desempenho das culturas (SANKARAN et al., 2015).

Na fenotipagem de plantas utilizam-se as imagens relacionadas aos tipos de equipamentos e suas sensibilidades fenóticas, obtidas na planta por meio de estudos adaptado de acordo com SOUSA *et al.* (2015): imagem digital (câmera digital/RGB): altura da planta, número de folhas, área foliar, taxa de desenvolvimento (área, massa ou altura) e biomassa; imagem na região do visível e infravermelho próximo (câmera multiespectral ou hiperespectral – 400 a 1100 nm): clorofila, carotenóides, antocianinas, pigmentos e índices derivados e imagens na região do infravermelho (câmera multiespectral ou

hiperespectral – 0,7 a 100 nm): teor de água, biomassa e nutrientes.

Por meio da espectroscopia por imagem, os métodos aplicados para fenotipagem digital são realizados de forma rápida e precisa, mantendo a integridade da planta e permitindo a avaliação ao longo de todo o ciclo da cultura. Essa abordagem é uma alternativa confiável e estruturada, facilitando o acompanhamento e monitoramento da cultura, além de reduzir a necessidade de insumos e recursos financeiros (SOUSA *et al.*, 2015).

Por meio da utilização das imagens de ARP, tornam-se acessíveis a extração de informações de maneira rápida, como a cobertura do dossel das plantas de batatas e o volume de pulverização ideal para a cultura (XIE *et al.*, 2022). O emprego dessas tecnologias na cultura da cenoura é interessante devido ao alto custo de manutenção manual e, por meio da mesma, traz melhorias em agilidade e rendimento. Foram calculados os índices vegetativos para determinar a variabilidade genética entre os acessos por meio da imagem e também identificaram sintomas de queima nas folhas e a estimativa de rendimento nas raízes, por meio do sensoriamento remoto (COELHO *et al.*, 2024). Na cultura da cebola foi possível por meio de imagens RGB e índices vegetativos. Foram determinadas variáveis, como altura, cobertura e volume de dossel, com a finalidade de monitorar a biomassa da cultura (BALLESTEROS *et al.*, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo, delineamento, acesso e herbicidas aplicados.

O experimento (Figura 3) foi conduzido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) em Cruz das Almas (BA). As manivas foram dispostas horizontalmente nos sulcos a uma profundidade de 10 cm, com o plantio sendo concluído no dia 03 de maio de 2023.

Figura 3. Mapa de localização experimental em Cruz das Almas (BA).



Fonte: elaborado pela autora (2024).

A partir disso utilizou-se no experimento o delineamento de blocos aumentados (DBA) em uma área total de 6.510 m², com 70 m de largura e 93 m de comprimento. Os espaçamentos entre plantas e entre linhas foram definidos como 0,50 m e 0,90 m, respectivamente. Foram avaliados 244 acessos do Banco Ativo de Germoplasma de Mandioca, compostos por 234 tratamentos não comuns e 10 tratamentos comuns (testemunhas), distribuídos em 10 blocos e 334 parcelas, cada uma contendo seis plantas. As variedades de testemunha foram: BRS-CS-01, BRS-Dourada, BRS-Kiriris, BRS-NovoHorizonte, BRS- PotiBranca, Cigana, Corrente, Eucalipto e Vassoura-Preta.

Para o controle das plantas daninhas, três herbicidas foram aplicados na fase de pós-emergência, de acordo com seus mecanismos de ação: mesotriona, cloransulam metílico e S-metolacoloro, conforme mostrado na Figura 4. A aplicação foi realizada em 23 de agosto de 2023, três meses após o plantio, durante a manhã, sob condições climáticas ensolaradas, utilizando um equipamento manual tipo carriola.

As dosagens dos produtos pulverizados foram de Mesotriona (120 gramas ha^{-1}), S-Metolacoloro (0,5 gramas ha^{-1}) e Cloransulam-metílico (30 gramas ha^{-1}).

4.2 Planejamento e Levantamento Aerofotogramétrico.

A ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) DJI Mavic 3M multirrotor que foi utilizada para o levantamento aerofotogramétrico, pertence a Embrapa Mandioca e Fruticultura de Cruz das Almas (BA). Esse equipamento dispõe de câmeras RGB (*Red, Green e Blue*) de 20 MP e Multiespectral (*Green, Red, Red Edge e Near Infrared (NIR)*) com 5,5 MP, por meio dele é possível obter os valores dos comprimentos de ondas para as seguintes bandas: verde ($550\text{ nm} \pm 16\text{nm}$), vermelha ($650\text{ nm} \pm 16\text{nm}$), borda vermelha ($730\text{ nm} \pm 16\text{ nm}$) e infravermelho próximo ($860\text{ nm} \pm 26\text{ nm}$).

Usou-se o DJI *Pilot* para planejamentos e execuções dos voos, na altura de 30m, sobreposição longitudinal 80% e lateral 70%. O GSD (*Ground Sample Distance* ou Distância da Amostra no Terreno) elemento definidor da resolução espacial das imagens coletadas, foi de aproximadamente 1cm/pixel para os quatro voos.

Os voos foram executados três meses após o final do plantio. Iniciou-se o imageamento no dia 23 de agosto de 2023 nas áreas, nas quais foram aplicados 3 tipos de tratamentos (Callisto, Dual e Pacto). Após esse processo, ocorreu a ação e a resposta dos herbicidas pelas superfícies das folhas, sendo absorvidos ou translocados nas cutículas (movimento de deslocamento de substâncias absorvidas da parte aérea da planta para as raízes).

Foram mapeados a partir das seguintes datas: *voo 1 (23/08/2023) – (10DAA); *voo 2 (02/09/2023) – (13DAA); *voo 3 (08/09/2023) – (16DAA) e *voo 4 (22/09/2023) – (30DAA)

4.3 Fenotipagem por Imagem: campo e digital

Na fenotipagem por imagem foram utilizadas duas observações, sendo a avaliação visual de plantas de mandioca “*in loco*” e análise dos dados obtidos através do mapeamento digitalmente, em que foram classificadas todas as parcelas manualmente, com a finalidade de observar sintomas característicos após a aplicação e ação dos defensivos quanto a tolerância a esses produtos.

Logo, a partir disso, foram realizadas as aplicações dos produtos (Callisto, Dual e Pacto) um dia antes de cada voo, para então ter uma melhor absorção e penetração dos produtos, tornando o ambiente ideal para as avaliações em campo.

Dessa maneira, foram criadas escalas para a análise visual em campo e o mesmo critério para a digital, sendo observada pela mesma melhorista, para estabelecer um padrão de observação, qualidade e precisão. Contudo, de acordo com a Tabela 1 foram definidos parâmetros como sintomas de fitotoxicidade

ocasionados pela ação dos herbicidas e escalonados em notas de 1 a 3, além de relacionar os indicativos apresentados nas plantas visualmente e a tolerância aos defensivos.

Tabela 1. Escala visual quanto a tolerância aos herbicidas.

Escala Visual	Sintomas	Tolerância
1	Plantas sem queima ou clorose nas folhas	altamente tolerante
2	Plantas com pouco sintomas de queima ou clorose das folhas	tolerante
3	Plantas com queima ou clorose moderada	moderadamente tolerante

Fonte: Adaptado de Reisane Santiago (*not published*) (2024).

Portanto, a partir das imagens obtidas com os sensores RGB e multiespectral, calcularam-se os índices vegetativos para analisar o comportamento espectral da cultura em relação à reação após a aplicação dos herbicidas, por meio do estudo dos pigmentos, principalmente a clorofila.

4.4 Processamento Fotogramétrico

Após a realização dos quatro voos foram realizados os processamentos das imagens coletadas pela ARP, por meio da plataforma OpenDroneMap disponível no *Github* (plataforma criada para desenvolver softwares de maneira colaborativa entre usuários e de código aberto - <https://github.com/OpenDroneMap/WebODM>) sendo código aberto para contribuição entre seus próprios usuários, e a interface do WebODM que permite utilizar a mesma por meio de uma forma mais intuitiva podendo ser acessada através do link <https://www.opendronemap.org/webodm/>.

Executaram-se os processamentos de todos os voos, da seguinte forma: identificação dos pontos de controle (pontos georreferenciados e identificáveis pela imagem), alinhamento de fotos – fototriangulação (determinação das coordenadas 3D de pontos do terreno/superfície pelas fotografias aéreas), construção da nuvem de pontos densificada, construção dos modelos – MDS (Modelo Digital de Superfície) e após a filtragem do mesmo o MDT (Modelo Digital do Terreno) e a construção da ortofoto.

4.5 Extração dos Índices Vegetativos

Em seguida depois do processamento das imagens obtidas pela ARP e com as ortofotos geradas tanto para a RGB e Multiespectral de todos os voos, utilizaram-se as ferramentas *FieldImageR* (2020) - *RStudio*, *FieldImage R* – Extra (2023) - *RStudio* e *FieldImageR* - QGIS (2023) para a extração dos índices vegetativos. Os códigos foram implementados na linguagem R e também executada em ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas) com uso do complemento (Painéis/Caixa de Ferramentas de Processamento/R/FIELDImageR) no QGIS (*Quantum GIS*) na versão 3.28.15.

As diversas funções disponibilizadas pelas ferramentas do *FieldImageR* são empregues para as análises de imagens coletadas por ARP e é disponibilizada através do *GitHub* (MATIAS *et al.*, 2020).

A Tabela 2 mostra os índices utilizados, suas equações, sensibilidade e referências de cada índice.

Tabela 2. Índices de vegetação e sensibilidade utilizados na pesquisa: RGB e Multiespectral.

Índices de Vegetação	Sigla	Câmara	Equação	Sensibilidade	Referência
<i>Chlorophyll Index – Red Edge</i>	CIRE	Multi	$(NIR/RE)-1$	Clorofila	<i>Gitelson et al.</i> (2003)
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	NDVI	Multi	$(NIR-R)/(NIR+R)$	Índice de área foliar, clorofila, biomassa e produtividade	<i>Rouse et al.</i> (1974).
<i>Normalized Difference Red Edge Index</i>	NDRE	Multi	$(NIR-RE)/(NIR+RE)$	Clorofila	<i>Gitelson and Merzlyak</i> (1994).
<i>Normalized Green Red Difference Index</i>	NGRDI	RGB	$(G-R)/(G+R)$	Clorofila, biomassa e teor de água da planta	<i>Tucker</i> (1979).

*Siglas e símbolos: R=banda do vermelho, G= banda do verde, B= banda do azul, NIR= banda do infravermelho próximo, RE= banda da borda vermelho, multi= multiespectral, RGB= região visível do espectro, sqrt= raiz quadrada, ²= elevado ao quadrado, += adição, -= subtração /= divisão, *= multiplicação.

Fonte: Adaptado de Filipe Matias – (2020).
<https://raw.githubusercontent.com/filipematias23/images/master/readme/F6ind3.jpeg>.

Foram analisados e testados diversos índices vegetativos para imagens RGB e multiespectrais. No entanto, para o estudo aplicado à cultura da mandioca, foram selecionados aqueles mais responsivos e indicativos de alterações relevantes para a cultura da mandioca.

Na extração dos índices foram seguidas as etapas: *FieldIndex*: nos parâmetros selecionou a imagem e as bandas para RGB (*Red, Green e Blue*) e na Multiespectral (*Red, Green, Red Edge e NIR*), índices usados para RGB (NGRDI) e multiespectral (NDVI, NDRE e CIRE).

Para a máscara com a segmentação de imagem por meio do *FieldMask*: seleciona a imagem e o *index* calculado anteriormente, acrescentou o filtro de base para remoção na RGB (HUE) e multiespectral (NDVI), com a *mask crop values* RGB (0) e multiespectral (0,30). E pela função *FieldInfo*: adicionada a imagem e arquivo shapefile, selecionou-se com base na média de cada parcela para extração das informações calculadas dos índices.

Os valores dos índices determinados por meio da ferramenta para cada parcela foram exportados para planilhas estando prontas para manipulação das informações e posteriormente realização da correlação com os dados coletados em campo, no caso deste trabalho, a variável foi a análise visual da tolerância dos herbicidas aplicados.

4.6 Análise estatística

Como os índices foram processados para 4 voos diferentes da mesma área em tempos distintos, foi utilizada a Análise de Variância para Medidas Repetidas, considerando os três tratamentos (herbicidas), para cada um dos índices. Para cada um dos quatro índices investigados, a significância entre os tempos foi analisada, com a correção de Greenhouse-Geisser caso a esfericidade não fosse atendida.

Quando a Anova para Medidas Repetidas indicou diferença entre os índices dentro das quatro repetições, foi realizado o teste de *Tukey* para verificar quais tratamentos apresentaram as diferenças significativas. Para todos os testes estatísticos, a significância utilizada foi de 5%, com o pacote estatístico Jamovi (JAMОВI, 2021).

5 RESULTADOS

A fenotipagem digital tem se mostrado uma ferramenta promissora na avaliação de cultivares de mandioca. Mesmo com a escala visual do experimento mostrando as notas dadas para a questão da análise de tolerância aos herbicidas, sendo entre 1 a 3 (obtidas em campo), já na fenotipagem digital tiveram apenas as notas 1 (sintomas – sem queima/clorose das folhas e altamente tolerante) e 2 (sintomas – pouco sintomas de queima/clorose das folhas e tolerante) de acordo com a Figura 4.

Figura 4. Notas atribuídas por meio da fenotipagem digital de imagens pela melhorista.

Voo 1 (Mesotrioma - Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 2. Tolerância herbicida: tolerante. Sintomas: pouca queima/clorose nas folhas.	
Voo 1 (S-Metolacoloro- Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 1. Tolerância herbicida: altamente tolerante. Sintomas: sem queima/clorose nas folhas.	
Voo 1 (Cloransulam-metilico- Parcela 97) BGM-0358	Escala visual: 1. Tolerância herbicida: altamente tolerante. Sintomas: sem queima/clorose nas folhas.	
Voo 2 (Mesotrioma - Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 2. Tolerância herbicida: tolerante. Sintomas: pouca queima/clorose nas folhas.	
Voo 2 (S-Metolacoloro- Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 1. Tolerância herbicida: altamente tolerante. Sintomas: sem queima/clorose nas folhas.	
Voo 2 (Cloransulam-metilico- Parcela 97) BGM-0358	Escala visual: 1. Tolerância herbicida: altamente tolerante. Sintomas: sem queima/clorose nas folhas.	
Voo 3 (Mesotrioma - Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 2. Tolerância herbicida: tolerante. Sintomas: pouca queima/clorose nas folhas.	
Voo 3 (S-Metolacoloro- Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 1. Tolerância herbicida: altamente tolerante. Sintomas: sem queima/clorose nas folhas.	
Voo 3 (Cloransulam-metilico- Parcela 97) BGM-0358	Escala visual: 2. Tolerância herbicida: tolerante. Sintomas: pouca queima/clorose nas folhas.	
Voo 4 (Mesotrioma - Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 2. Tolerância herbicida: tolerante. Sintomas: pouca queima/clorose nas folhas.	
Voo 4 (S-Metolacoloro- Parcela 97) BRS-Mulatinha	Escala visual: 2. Tolerância herbicida: tolerante. Sintomas: pouca queima/clorose nas folhas.	
Voo 4 (Cloransulam-metilico- Parcela 97) BGM-0358	Escala visual: 1. Tolerância herbicida: altamente tolerante. Sintomas: sem queima/clorose nas folhas.	

Fonte: elaborado pela autora (2024).

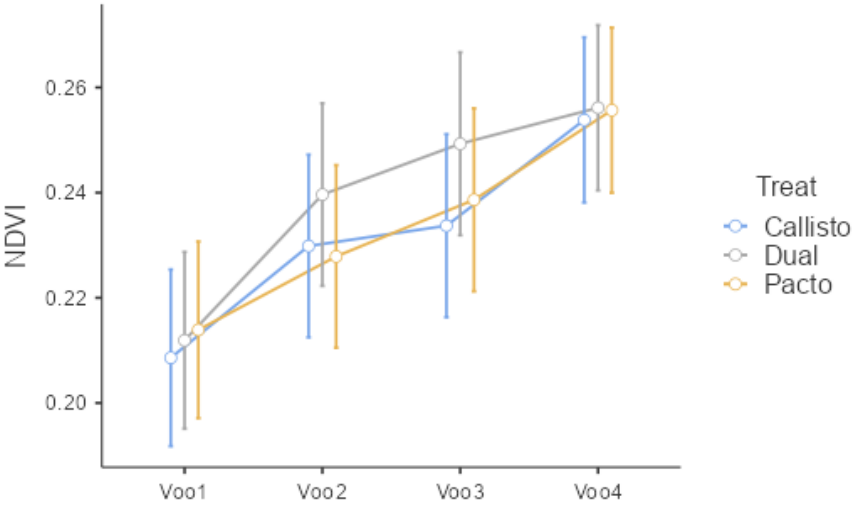
A partir disso encontram-se os resultados relevantes encontrados para os índices vegetativos: NDVI (Tabela 3 e Figura 5), NDRE (Tabela 4 e Figura 6), CIRE (Tabela 5 e Figura 7) e NGRDI (Tabela 6 e Figura 8), os dados tabulados que mostram essa relação entre os dias de cada medição (10, 13, 16, 30DAA) estão mostrados nas tabelas e também sendo possível ver por meio dos gráficos a dependência entre o tratamento quanto aos dias.

Tabela 3. Diferenças significativas para o NDVI.

Voo	Tratamento	Voo	Tratamento	Valor-p
10DAA	Callisto	16DAA	Dual	0,046
10DAA	Callisto	30DAA	Callisto	0,003
10DAA	Callisto	30DAA	Dual	0,003
10DAA	Callisto	30DAA	Pacto	0,004
10DAA	Dual	16DAA	Dual	0,033
10DAA	Dual	30DAA	Callisto	0,019
10DAA	Dual	30DAA	Dual	0,004
10DAA	Dual	30DAA	Pacto	0,011
10DAA	Pacto	30DAA	Callisto	0,033
10DAA	Pacto	30DAA	Dual	0,017
10DAA	Pacto	30DAA	Pacto	0,009

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 5. Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10, 13, 16, 30DAA) para o NDVI.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

❖ Análise para o NDVI

Os resultados indicam diferenças significativas no índice NDVI ($p < 0,05$) entre os grupos analisados, evidenciando alterações relevantes tanto ao longo do tempo quanto entre os tratamentos.

As diferenças médias variam entre -0,03738 e -0,04755, refletem mudanças pequenas, porém estatisticamente detectáveis. Os maiores impactos foram observados no intervalo entre 10DAA e 30DAA, sugerindo que o tempo ou os tratamentos tiveram maior influência nesse período. Por outro lado, as menores diferenças médias foram registradas em intervalos mais curtos, como entre 10DAA e 16DAA.

Entre os destaques, a maior diferença média ocorreu na comparação entre 10DAA Callisto e 30DAA Dual (-0,04755; $p = 0,003$), enquanto a menor foi entre 10DAA Dual e 16DAA Dual (-0,03738; $p = 0,033$). Esses resultados reforçam a maior sensibilidade do índice NDVI em períodos mais extensos, com mudanças mais discretas, porém ainda significativas, em intervalos curtos.

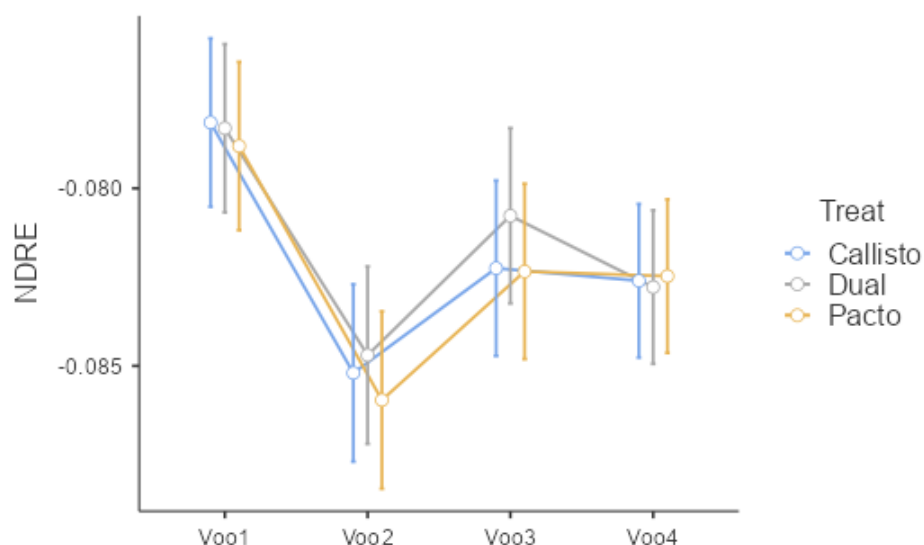
Do ponto de vista prático, as alterações detectadas no NDVI indicam impactos fisiológicos ou biofísicos importantes na vegetação. Esses resultados são especialmente relevantes para avaliar a influência de diferentes tratamentos, com os herbicidas, ao longo do tempo, oferecendo informações valiosas para práticas agrícolas e manejo sustentável.

Tabela 4. Diferenças significativas para o NDRE.

Voo	Tratamento	Voo	Tratament o	Valor-p
10DAA	Callisto	13DAA	Callisto	<,001
10DAA	Callisto	13DAA	Dual	0,011
10DAA	Callisto	13DAA	Pacto	<,001
10DAA	Dual	13DAA	Callisto	0,005
10DAA	Dual	13DAA	Dual	<,001
10DAA	Dual	13DAA	Pacto	<,001
10DAA	Dual	13DAA	Callisto	0,015
10DAA	Dual	13DAA	Dual	0,039
10DAA	Dual	13DAA	Pacto	<,001
13DAA	Callisto	16DAA	Callisto	<,001
13DAA	Dual	16DAA	Dual	<,001
13DAA	Pacto	16DAA	Pacto	<,001

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 6. Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10, 13, 16, 30DAA) para o NDRE .



Fonte: elaborado pela autora (2024).

❖ Análise para o NDRE

Os resultados demonstram diferenças estatisticamente significativas no índice NDRE ($p < 0,05$), evidenciando influências importantes dos tratamentos e dos momentos avaliados.

As diferenças médias variaram de 0,00589 a 0,00781 (positivas), indicando aumentos no NDRE, e de -0,00295 a -0,00392 (negativas), sugerindo reduções. O índice apresentou um aumento consistente entre 10DAA e 13DAA, seguido por uma redução entre 13DAA e 16DAA.

Em relação ao padrão temporal, no intervalo de 10DAA a 13DAA, foi observado um aumento significativo no NDRE, com destaque para a comparação entre 10DAA Dual e 13DAA Pacto ($t = 4,9234$, $p < 0,001$). Por outro lado, no período de 13DAA a 16DAA, houve uma redução expressiva, como em 13DAA Dual vs. 16DAA Dual ($t = -6,8027$, $p < 0,001$).

Entre os tratamentos, o Pacto apresentou os maiores aumentos entre 10DAA e 13DAA, exemplificados pela comparação 10DAA Callisto vs. 13DAA Pacto ($t = 4,4545$, $p < 0,001$). Já o tratamento Dual registrou a maior redução entre 13DAA e 16DAA, com uma diferença média de -0,00392 ($p < 0,001$).

Os destaques específicos incluem o maior aumento no NDRE, registrado entre 10DAA Callisto e 13DAA Pacto (0,00781, $p < 0,001$), e a maior redução, observada entre 13DAA Dual e 16DAA Dual (-0,00392, $p < 0,001$).

Esses resultados reforçam que o índice NDRE é sensível tanto ao tempo quanto ao tipo de tratamento, refletindo o desenvolvimento vegetativo e as possíveis alterações causadas por práticas agrícolas.

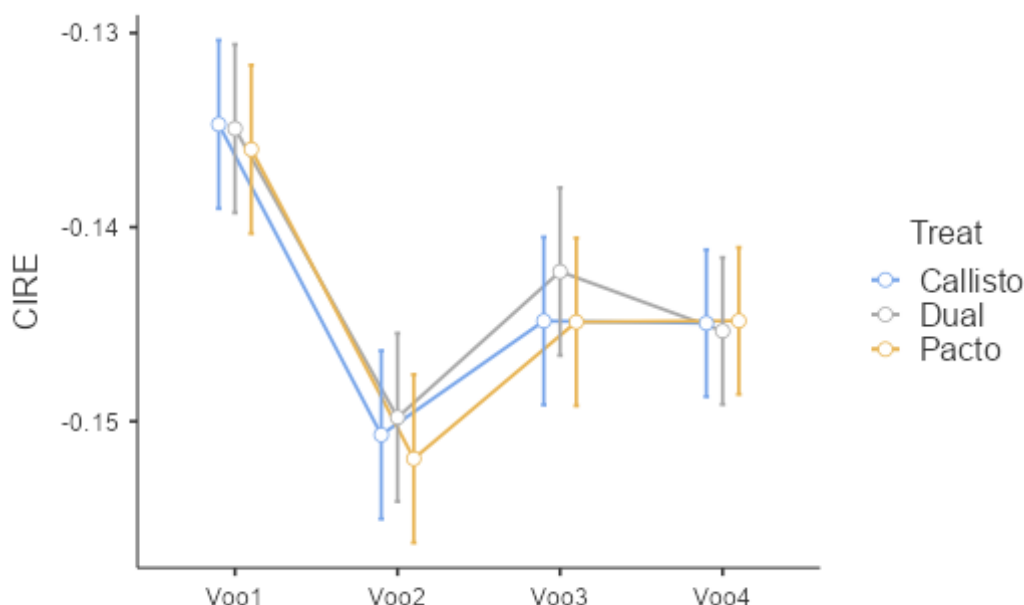
A análise das variações ao longo dos dias é fundamental para compreender a resposta da vegetação aos diferentes manejos, fornecendo subsídios importantes para a tomada de decisões no campo.

Tabela 5. Diferenças significativas para o o CIRE.

Voo	Tratamento	Voo	Tratamento	Valor-p
10DAA	Callisto	13DAA	Callisto	<,0001
10DAA	Callisto	13DAA	Dual	<,0001
10DAA	Callisto	13DAA	Pacto	<,0001
10DAA	Callisto	16DAA	Callisto	0,0144
10DAA	Callisto	30DAA	Callisto	0,0146
10DAA	Callisto	30DAA	Dual	0,0156
10DAA	Callisto	30DAA	Pacto	0,0286
10DAA	Dual	13DAA	Callisto	<,0001
10DAA	Dual	13DAA	Dual	<,0001
10DAA	Dual	13DAA	Pacto	<,0001
10DAA	Dual	30DAA	Callisto	0,0319
10DAA	Dual	30DAA	Dual	0,0116
10DAA	Dual	30DAA	Pacto	0,0364
10DAA	Pacto	13DAA	Callisto	0,0002
10DAA	Pacto	13DAA	Dual	0,0007
10DAA	Pacto	13DAA	Pacto	<,0001
13DAA	Callisto	16DAA	Callisto	<,0001
13DAA	Dual	16DAA	Dual	<,0001
13DAA	Dual	16DAA	Dual	<,0001

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 7. Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10, 13, 16, 30DAA) para o CIRE.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

❖ Análise para o CIRE

O padrão temporal revelou um aumento consistente no índice CIRE entre 10DAA e 13DAA, relacionado ao desenvolvimento vegetativo inicial, especialmente no tratamento Pacto, que apresentou as maiores variações. Entre 13DAA e 16DAA, foi observada uma redução no índice, sugerindo possíveis alterações fisiológicas nas plantas, como estresse ou mudanças na absorção de luz.

Em termos de tratamentos, o Pacto apresentou os maiores aumentos (como em 10DAA Callisto vs. 13DAA Pacto, 0,0172) e as maiores reduções (como em 13DAA Pacto vs. 16DAA Pacto, -0,0072). O tratamento Dual também apresentou diferenças significativas, particularmente na redução entre 13DAA e 16DAA (-0,0075).

Os destaques específicos incluem o maior aumento observado entre 10DAA Callisto e 13DAA Pacto (0,0172, $p < 0,0001$) e a maior redução entre 13DAA Dual e 16DAA Dual (-0,0075, $p < 0,0001$).

A relevância prática desses resultados sugere que o aumento do índice CIRE entre 10DAA e 13DAA pode estar relacionado ao avanço da cobertura vegetal e à resposta ao tratamento, enquanto a redução após 13DAA pode refletir alterações fisiológicas, como estresse ou mudanças nas condições ambientais. O tratamento Pacto demonstrou ter uma influência mais acentuada, sendo útil para estratégias de manejo agrícola.

Tabela 6. Diferenças significativas para o o NGRDI.

Voo	Tratamento	Voo	Tratamento	Valor-p
10DAA	Callisto	16DAA	Callisto	<,0001
10DAA	Callisto	30DAA	Callisto	<,0001
10DAA	Callisto	30DAA	Dual	<,0001
10DAA	Callisto	30DAA	Pacto	<,0001
10DAA	Dual	16DAA	Dual	<,0001
10DAA	Dual	30DAA	Callisto	<,0001
10DAA	Dual	30DAA	Dual	<,0001
10DAA	Dual	30DAA	Pacto	<,0001
10DAA	Pacto	16DAA	Pacto	<,0001
10DAA	Pacto	30DAA	Callisto	<,0001
10DAA	Pacto	30DAA	Dual	<,0001
10DAA	Pacto	30DAA	Pacto	<,0001
13DAA	Callisto	30DAA	Callisto	<,0001
13DAA	Callisto	30DAA	Dual	<,0001
13DAA	Callisto	30DAA	Pacto	<,0001
13DAA	Dual	30DAA	Callisto	<,0001
13DAA	Dual	30DAA	Dual	<,0001
13DAA	Dual	30DAA	Pacto	<,0001
13DAA	Pacto	30DAA	Callisto	<,0001
13DAA	Pacto	30DAA	Pacto	<,0001
16DAA	Callisto	30DAA	Callisto	<,0001
16DAA	Callisto	30DAA	Dual	<,0001
16DAA	Callisto	30DAA	Pacto	<,0001
16DAA	Dual	30DAA	Callisto	<,0001
16DAA	Dual	30DAA	Dual	<,0001
16DAA	Dual	30DAA	Pacto	<,0001
16DAA	Pacto	30DAA	Callisto	<,0001
16DAA	Pacto	30DAA	Dual	<,0001
16DAA	Pacto	30DAA	Pacto	<,0001

Fonte: elaborado pela autora (2024).

Figura 8. Relação dependência entre o tratamento (Callisto, Dual e Pacto) quanto aos dias (10, 13, 16, 30DAA) para o NGRDI.



Fonte: elaborado pela autora (2024).

❖ Análise para o NGRDI

A análise dos dados identificou reduções altamente significativas no índice NGRDI ($p < 0,0001$) ao longo do tempo e entre os tratamentos avaliados. As comparações apresentaram diferenças estatísticas robustas, com valores de p-Tukey consistentemente menores

que 0,0001, indicando que as variações observadas são estatisticamente relevantes.

As diferenças médias variaram de -0,0315 a -0,0451, com os maiores declínios ocorrendo entre os períodos de 13DAA/16DAA e 30DAA. Entre 13DAA e 30DAA, a maior redução foi observada na comparação entre 13DAA Pacto e 30DAA Callisto (-0,0451), seguida por 13DAA Pacto vs. 30DAA Dual (-0,0446). Entre 16DAA e 30DAA, o tratamento Callisto apresentou a maior redução (-0,0362), com diferenças semelhantes entre os tratamentos Dual e Pacto.

Em termos de tratamentos, Callisto mostrou as maiores quedas, seguidas por Dual, que também apresentou reduções significativas, especialmente entre 13DAA e 30DAA. O tratamento Pacto, embora com reduções menores, ainda gerou variações estatisticamente significativas, como entre 16DAA e 30DAA (-0,0317).

Portanto, o índice NGRDI mostrou uma redução consistente ao longo do tempo, particularmente entre 13DAA/16DAA e 30DAA. Callisto causou os maiores declínios, seguidos por Dual, e Pacto teve reduções menos evidenciadas. Os valores elevados de t reforçam a consistência e a significância das mudanças observadas. Esses resultados indicam uma tendência de declínio no índice NGRDI ao longo do tempo e destacam a influência diferenciada dos tratamentos agrícolas sobre a vegetação.

6 DISCUSSÕES

A produção de mandioca no Brasil enfrenta desafios que demandam uma compreensão aprofundada da produtividade total e de seus fatores determinantes. Entender esses aspectos é essencial para embasar a tomada de decisões sobre as práticas de manejo agrônomo mais adequadas, promovendo não apenas o aumento da produtividade, mas também a sustentabilidade da cultura e a segurança alimentar. Esse impacto estende-se tanto às pequenas propriedades familiares quanto aos cultivos em maior escala. No entanto, ainda são necessárias pesquisas científicas mais detalhadas para identificar com precisão os principais fatores limitantes em cada região produtora do país, permitindo a adoção de estratégias mais eficazes e adaptadas às particularidades locais (VISSES, SENTELHAS, e PEREIRA, 2017).

A aplicação de herbicidas em cultivares de mandioca pode impactar significativamente o processo fotossintético, além de provocar alterações na estrutura foliar e no crescimento das plantas. Este estudo inovador explora a interação entre fisiologia e morfologia nos estágios iniciais de desenvolvimento da mandioca após a exposição aos herbicidas. Os resultados evidenciam tanto efeitos benéficos quanto adversos, abrangendo aspectos morfofisiológicos e de crescimento, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos dessas substâncias na cultura (DOS SANTOS *et al.*, 2022).

A fenotipagem de plantas continua sendo um grande desafio no melhoramento genético e na agricultura, devido às dificuldades na aplicação prática. Embora este artigo apresente algumas dessas aplicações, diversas limitações foram identificadas na implementação dessas técnicas. Os principais obstáculos incluem a geração e a transmissão de dados precisos, fundamentais para uma interpretação adequada dos resultados e para garantir a reprodutibilidade dos mesmos (CHAWADE *et al.*, 2019).

A produção de mandioca pode ser significativamente aprimorada com o manejo adequado da cultura e do solo, aliado ao uso de variedades de alto rendimento, além de resistentes a doenças, pragas e estresse abiótico (DEVI *et al.*, 2022).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As variações genéticas entre cultivares de mandioca influenciam diretamente sua tolerância a herbicidas, ressaltando a importância de informações técnicas específicas para o manejo eficiente de plantas daninhas nessa cultura. A utilização de índices vegetativos obtidos por imagens RGB e multiespectrais, após a aplicação de herbicidas como Callisto, Dual e Pacto, demonstrou potencial para a fenotipagem de alto desempenho na mandioca.

Contudo, os efeitos desses defensivos, como a inibição de clorofila, branqueamento, amarelamento das folhas e redução do crescimento, alteram significativamente os índices relacionados à área foliar, vigor da planta e conteúdo de clorofila. Portanto, os resultados reforçam a relevância de abordagens integradas que combinem ferramentas digitais, avaliações visuais e conhecimentos agronômicos, visando ao manejo sustentável da mandioca e à otimização do uso de herbicidas na cultura.

A limitação em observar os sintomas nas folhas, não foi capaz de identificar com precisão os sintomas de fitotoxicidade em imagens capturadas a uma altura de voo de 30 metros, evidenciando a necessidade de aprimorar as metodologias de captura e análise ou de combiná-las com avaliações visuais diretas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, R. J. *The role of remote sensing in enhancing photogrammetric methods*. *Geoinformatics Journal*, v. 15, n. 2, p. 34-50, 2022. DOI: 10.3390/rs14030778.
- ADAPAR. **Cletodim Nortox**. Arapongas, PR, 2022. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2023-02/cletodimnortox.pdf. Acesso em: 3 ago. 2024.
- ADEGAS, F. S.; VARGAS, L.; GAZZIERO, D. L. P.; KARAM, D.; SILVA, A. F. da; AGOSTINETTO, D. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Circular Técnica 132. ISSN, 2176-2864, Londrina, PR: Embrapa, 2017.
- AGNA, D. B. **Correlação entre índices de vegetação e componentes fisiológicos de folhas da aroeira**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônoma) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Itapina, Colatina, 2021. Orientador: Evandro Chaves de Oliveira.
- AGOSTINETTO, D.; VARGAS, L.; GAZZIERO, D. L. P.; SILVA, A. A. da. **Manejo de plantas daninhas**. 2015, Cap. 11, p. 234-255. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1022693>. Acesso em: 3 ago. 2024.
- AGROFIT. **Consulta de ingrediente ativo: dados do ingrediente ativo**. [S. l.], 2019. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/ap_ing_ativo_detalhe_cons?p_id_ingrediente_ativo=175. Acesso em: 1 ago. 2024.
- ALARCÃO JÚNIOR, J. C. de; COAGUILA NUÑEZ, D. N. **O uso de drones na agricultura 4.0**. *Brazilian Journal of Science*, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2024. ISSN 2764-3417. DOI: 10.14295/bjs.v3i1.438.
- ALBUQUERQUE, M.; CARDOSO, E. M. R. **Utilização da mandioca na Amazônia**. Embrapa – CPATU, (Documento, 25), ISSN, 0101-2835. Belém (PA), 1983.
- ALBUQUERQUE, J. A. A.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A.; CARNEIRO, J. E. S.; CECON, P. R.; ALVES, J. M. A. **Interferência de plantas daninhas sobre a produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*)**. *Planta Daninha*, Campinas, v. 26, n. 2, p. 279-289, 2008. DOI: 10.1590/S0100-83582008000200004.
- ALCÂNTARA, E. N.; CARVALHO, J. E. B.; LIMA, P. C. **Determinação do período crítico de competição das plantas daninhas com a cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. In: EPAMIG (Belo Horizonte). Projeto mandioca; relatório 76/79. Belo Horizonte, 1982.
- ANDRADE JUNIOR, A, S. de.; *et al.* **Evaluation of the nutritional status of corn by vegetation indices via aerial images**. *Ciência Rural*, v. 51, n. 8, e20200692, 2021. DOI: 10.1590/0103-8478cr20200692.
- ARAÚS, J. L *et al.* **Translating high-throughput phenotyping into genetic gain**. *Trends in plant science*, v. 23, n. 5, p. 451-466, 2018. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.02.001.
- BAEZA, S.; & PARUELO, J. M. **Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata Grasslands: an analysis based on MODIS NDVI time series**. *Remote Sensing*, v.12 n.3, p. 381, 2020. DOI: 10.3390/rs12030381.

BALKE, N. E. ***Herbicide effects on membrane functions***. January 2018, DOI: 10.1201/9781351077736-5. In book: *Weed Physiology* (p.113-139).

BALLESTEROS, R.; ORTEGA, J.F.; HERNANDEZ, D.; MORENO, M.A. ***Onion biomass monitoring using UAV-based RGB imaging***. *Precis. Agric.* 2018, 19, 840 – 857. DOI: 10.1007/s11119-018-9560-y.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coordenação-geral de agrotóxicos e afins**. Brasília, DF, 2011.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 6ª Ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010. 535p.

CAMBRAIA FILHO, D. J.; BRITES, R. S.; BIAS, E. de S.. **Potencialidades de aplicação dos índices de vegetação baseados na porção visível do espectro das radiações eletromagnéticas**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, [s.l.], 2019. DOI:10.11137/2019_4_83_93.

CARDOSO, C. E. L.; SOUZA, J. da S. **Aspectos agroeconômicos da cultura da mandioca: potencialidades e limitações**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 1999. 27 p. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Documentos, 86), Cruz das Almas (BA).

CARDOSO, C. E. L. **Competitividade e inovação tecnológica na cadeia agroindustrial de fécula de mandioca no Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. DOI: 10.11606/T.11.2003.tde-04122003-151241. Acesso em: 19 abr. 2024.

CARVALHO, F. P. de; CASTRO NETO, M. D.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. A.; CECON, P. R. **Tolerância de cultivares de mandioca aos herbicidas fomesafen e fluazifop-p-butil**. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 10, n. 3, p. 219-231, dez. 2011. DOI: 10.7824/rbh.v10i3.125.

CARVALHO, J. E. B. **Plantas daninhas e seu controle**. In: MATTOS, P. L. P.; GOMES, J. C. (Coords.). *O cultivo da mandioca*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2000. p. 42- 52.

CHAWDE, A.; VAN HAM, J.; BLOMQUIST, H.; BAGGE, O.; ALEXANDERSSON, E.; ORTIZ, R. ***High-throughput field-phenotyping tools for plant breeding and precision agriculture***. *Agronomy*, 2019, 9 (5), 258. DOI: 10.3390/agronomy9050258.

CHRISTOFFOLETI, E. J.; NICOLAI, M. **Aspectos de resistência de plantas daninhas a herbicidas**. 4. ed. Piracicaba: Associação Brasileira de Ação à Resistência de Plantas Daninhas aos Herbicidas (HRAC-BR), editora. ESALQ, p.262, Piracicaba (SP), 2016.

CLAROS, E. N. C.. ***Cálculo de índices espectrales para el área del Delta del Río San Juan, Bahía Málaga y Bahía de Buenaventura, a partir del uso de imágenes de PlanetScope en Google Earth Engine***. Proyecto de grado (Especialización en Sistemas de Información Geográfica) – Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil, Bogotá, 2023. Diretor: Ing. Mcs. RaúlEcheverry Barreto. Linha de Pesquisa: Ingeniería computacional aplicada a la geomática.

COELHO, F. G. T.; MACIEL, G. M.; SIQUIEROLI, A. C. S.; GALLIS, R. B. de A.; OLIVEIRA, C. S. de ; RIBEIRO, A. L. A.; PEREIRA, L. M. **High-throughput phenotyping for the evaluation of agronomic potential and root quality in tropical carrot using RGB sensors.** *Agriculture*, v. 14, p. 710, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14050710.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Análise mensal mandioca: maio de 2024.** Gerência de Fibras e Alimentos Básicos (GEFAB), Brasília – DF, 2024. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-mandioca/item/download/53836_b1f1653c61a519ac1290dc3d6be25add. Acesso em: 30 jul. 2024.

DECARLI, L.; LUDWIG, M. P.; FREIBERG, J. A.; GIROTTO, E.. **Tratamento industrial em sementes de soja: qualidade fisiológica e desempenho da cultura.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 14, n. 3, e6235, 2019. ISSN 1981-0997. DOI: 10.5039/agraria.v14i3a6235.

DEVI, B.; KUMAR, M. N.; CHUTIA, M.; BHATTACHARYYA, N. **Abiotic and biotic stress challenges of cassava in changing climate and strategies to overcome: a review.** *Scientia Horticultures*, vol. 305, p. 111432, issn. 0304-4238. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111432.

DOS SANTOS, J. C. C.; COSTA, R. N.; SILVA, D. M. R.; ROCHA, D. F. da.; SILVA, M. De A.; PAVÃO, J.; M. da S. J.; SILVA, J. V. **Photochemical, anatomical and growth changes in cassava cultivars after application of Pos-Emergent Herbicides.** *Agriculture*, v. 12, n. 7, p. 950, 2022. DOI: 10.3390/agriculture12070950.

DUARTE, T. M. **Efeito de herbicidas no crescimento, produtividade e atributos de qualidade na cultura da batata-doce.** Orientador: Leandro Tropaldi. 2024. 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) – Universidade Estadual Paulista (Unesp) – Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas – Campus de Dracena, Dracena – SP, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/bdc8876e-0076-4a2f-b1c5-f5a0a9f75229/content>. Acesso em: 3 ago. 2024.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Fenotipagem de plantas: as novas técnicas que estão surgindo para atender os desafios atuais e futuros.** Dez. 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/115771/1/Fenotipagem.pdf>. Acesso em: 29 maio. 2024.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Tabela periódica dos herbicidas.** Londrina, PR, 2004. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/1355202/1529289/Tabela_peri%C3%B3dica_herbicidas.pdf/5c2b3f01-6fa7-49eb-89a3-c26bc7ac3193. Acesso em: 3 ago. 2024.

ESCADAFAL, R.; BELGHITH, A.; BEM, M. H. **Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride.** In *Actes du Sixième Symposium International. Mesures physiques et Signatures spectrales en Télédétection*, p.17-21, 1994.

ESTES, J. E. **Remote sensing of environmental quality.** *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 40, n. 6, p. 721-732, 1974.

FAGLIARI, J. R.; JÚNIOR, R. S. de O.; CONSTANTIN, J. **Métodos de avaliação da seletividade de herbicidas para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** *Acta Scientiarum*, Maringá – PR, v. 23, n. 5, p. 1229-1234, 2001. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4498423/mod_resource/content/8/Parcelas%20pareadas.pdf. Acesso em: 2 ago. 2024.

FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*). **Dados da produção mundial da mandioca**. Disponível em: <https://www.fao.org/common-pages/search/en/?q=cassava>. Acesso em: 30 jul. 2024.

FERREIRA, E. A.; MATOS, C. da C. de; BARBOSA, E. A.; SILVA, D. V.; SANTOS, J. B. dos; PEREIRA, G. A. M.; FARIA, A. T.; SILVA, C. T. da. **Respostas fisiológicas da mandioca à aplicação de herbicidas**. Semina: Ciências Agrárias, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 645–656, 2015. DOI: 10.5433/1679-0359.2015v36n2p645. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/15956>. Acesso em: 01 set. 2024.

FERREIRA, F. A.; *et al.* **Mecanismos de ação herbicida**. In: ZAMBOLIM, Laércio *et al.* (Org.). Produtos fitossanitários: fungicidas, inseticidas, acaricidas e herbicidas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. Cap. 8, p. 349-382.

FLECK, N. G. **Princípios do controle de plantas daninhas**. Porto Alegre: UFRGS, 1992.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p. Disponível em: http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o_em_Sensoriamento_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC. Acesso em: 28 ago. 2024.

FOLONI, L. L.; PLESE, L. P. M.; SILVA, C. L.; FILHO, J. T. **Avaliação de herbicidas aplicados em pós-emergência sobre e sob a palha em cana crua e o destino ambiental**. Planta Daninha, v. 29, n. 2, p. 447–455, abr. 2011. DOI: 10.1590/s0100-83582011000200023.

FONTES, J. R. A.; SHIRATSUCHI, L. S.; NEVES, J. L.; JULIO, L. de.; SODRÉ FILHO, J. **Manejo integrado de plantas daninhas**. Documentos 113, p.48, Planaltina (DF): Embrapa Cerrados, dez. 2003.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D'el Arco. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

FREIRE-SILVA, J.; PAZ, Y. M.; LIMA-SILVA, P. P.; PEREIRA, J. A. dos S.; CANDEIAS, A. L. B. **Remote sensing vegetation index for processing images in the visible band (RGB)**. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 9, n. 4, p. 228-239, 2019. ISSN 2237-2202.

FUKUDA, W. M. G.; PORTO, M. C. M. **A mandioca no Brasil**. In: HERSHEY, C. H. (Org.). *Mejoramiento genético de la yuca en América Latina*. Cali, Colômbia: CIAT, 1991. p. 15-42.

FUKUDA, W. M. G.; SILVA, S. O. E. **Melhoramento de mandioca no Brasil**. In: CEREDA, Marney Pascoali (Org.). *Agricultura: tuberosas amiláceas latino-americanas*. 1. ed. São Paulo: Fundação Cargill, 2002. v. 2, p. 242-257.

FURIAN, P. H. **Espectro eletromagnético**. [S.L.], 2016. Disponível em: <http://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>. Acesso em: 28 ago. 2024.

GARCÍA-HARO, J. *et al.* **Assessing the performance of vegetation indices for estimating chlorophyll content in crops**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 226, p. 110-121, 2016.

GARCÍA-HARO, J. *et al.* **Evaluation of vegetation indices for monitoring crop growth and health**. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 66, n. 20, p. 5165-5175, 2018.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. **Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves**. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 22, n. 3, p. 247-252, 1994. DOI: 10.1016/1011-1344(93)06963-4.

GITELSON, A.A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M.N. ***Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves***. *Journal of Plant Physiology* 160: 271-282, 2003. DOI: 10.1078/0176-1617-00887.

GIULIANO MARCHI (Distrito Federal). **Herbicidas: mecanismos de ação e uso**. Embrapa (Org.), 2008. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC2010/30295/1/doc-227.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2024.

GOMES, R. **Fotogrametria digital: aplicações e metodologias**. Curitiba: Editora Ciência, 2008.
HUETE, A. R. *et al.* ***Overview of the vegetation index literature and applications***. *Remote Sensing of Environment*, v. 65, n. 1, p. 167-193, 1998.

HUNT, E. R. EITEL, J.; DAUGHTRY, C.; LONG, D. ***Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index***. *Agronomy Journal*, [s.l.], v. 103, n. 4, p.1090-1099, mai 2011.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ISPRS). ***Photogrammetry and remote sensing: the art, science, and technology of obtaining reliable information from sensor systems***. ISPRS, 1979.

JAMOVI. ***Jamovi: stats open now***. 2021. Disponível em: <https://jamovi.org/>. Acesso em: 01 jun 2024.

JENSEN, J. R. ***Remote sensing of the environment: an earth resource perspective***. Pearson education, 1 ed. 592 p., 2007.

JOHNSON, Emma L. ***The impact of drone technology on geospatial data collection***. *International Journal of Geographic Information Science*, v. 34, n. 2, p. 123-145, 2020.

JONES, H. G. ***Application of the Green Line Index (GLI) for assessing vegetation stress and growth in precision agriculture***. *Precision Agriculture*, v. 17, n. 3, p. 249-265, 2016.

JÚNIOR, F. de A. G. **Produtividade de variedades de mandioca em diferentes arranjos de plantio, épocas de colheita, fisiologia do estresse e déficit hídrico**. Orientador: Mauricio Antonio Coelho Filho. 2018. 86 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2018. Disponível em: https://ri.ufrb.edu.br/bitstream/prefix/1025/1/Produtividade_Varieties_Mandioca_Tese_2018.pdf. Acesso em: 3 ago. 2024

JÚNIOR, M. de S. M.; ALVES, R. N. B. **Seleção de manivas - semente de mandioca**. Embrapa: Brasília (DF), 2014.

KANEMASU, E. T. ***Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean***. *Remote Sensing of Environment*, v. 3, n. 1, p. 43-47, jan. 1974. DOI: 10.1016/0034-4257(74)90037-6.

KELLY, T. B. ***Remote sensing and photogrammetry: a synergistic relationship***. *Journal of Spatial Technology*, v. 21, n. 3, p. 112-128, 2023.

KIM, M. S. *et al.* ***Comparison of vegetation indices for monitoring crop growth and detecting stress***. *Sensors*, v. 14, n. 12, p. 23258-23278, 2014.

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. ***Applied linear statistical models***. 5. ed. Chicago: McGraw-Hill Education, 2004.

- LARA, A. C. C.; BICUDO, S. J.; BRACHTVOGEL, E. L.; ABREU, M. L.; CURCELLI, A. F. **Melhoramento genético da cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz).** *Raízes e Amidos Tropicais*, v. 4, p. 54-64, 2008.
- LEE, S. K. **Drone-based photogrammetry: benefits and challenges.** *Geospatial World*, v. 18, n. 4, p. 45-60, 2022.
- LI, Z. *et al.* **Evaluation of the brightness index for assessing vegetation cover and land degradation.** *Remote Sensing*, v. 8, n. 2, p. 123-136, 2016.
- LIRA, M. A. *et al.* **Recomendações técnicas para o cultivo da mandioca.** Natal, RN, 2010. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/EMPARN/DOC/DOC000000000206073.PDF>. Acesso em: 31 jul. 2024.
- LI, L.; ZHANG, Q.; HUANG, D. **A review of imaging techniques for plant phenotyping.** *Sensors*, v. 14, n. 11, p. 20078-20111, 2014. DOI: 10.3390/s14112078.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. K.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation.** 6. ed. New York: Wiley, 2008. 770 p.
- LIU, C.; LI, W.; LI, Z.; LIU, H. **Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in agriculture: a review.** *Precision Agriculture*, p. 1-20, 2021.
- LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. (2001). **Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat.** *Geocarto International*, vol.16, n.1, p. 65-70, 2001. DOI: 10.1080/10106040108542184.
- MATIAS, F. I.; GREEN, A.; LACHOWIEC, J. A.; LEBAUER, D.; FELDMAN, M. **Bison-fly: An open-source UAV pipeline for plant breeding data collection.** *The Plant Phenome Journal*, v. 5, n. 1, Artigo e20048, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppj2.20048>.
- MATIAS, F. I.; CARAZA-HARTER, M. V.; ENDELMAN, J. B. **FIELDimageR: an R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials.** *Plant Phenome Journal*, v. 3, n. 1, Artigo 20005, 2020. DOI: 10.1002/ppj2.20005.
- MATHIEU, R.; POUGET, M.; CERVELLE, B.; ESCADAFAL, R. **Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using 6 laboratory reflectance data and typical soil color of an arid environment.** *Remote sensing of environment*, v. 66, n. 1, p. 17-28, 1998. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00030-3.
- MARTIN, P. **Vegetation indices and their applications in remote sensing.** In: *Remote Sensing for Natural Resources Management*. Springer, 2020. p. 45-67.
- MARTINEZ, David R. **The evolution of photogrammetry through drone technology.** *Journal of Spatial Science*, v. 68, n. 1, p. 85-102, 2023.
- MATHISEN, H. *et al.* **The use of the normalized difference red edge (NDRE) index for assessing plant stress: A review.** *Journal of Plant Physiology*, v. 238, p. 58-71, 2019.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- MCKINNON, T.; HOFF, P. **Comparing RGB-based vegetation indices with NDVI for agricultural drone imagery.** Boulder, 2017. Disponível em: <https://agribotix.com/blog/2017/04/30/comparing-rgb-based-vegetation-indices-with-ndvi-for-agricultural-drone-imagery/> > Acesso em: 3 ago. 2024.

- MICASENSE. *Micasense rededge-m™ multispectral camera: user manual*. [S. l.], 2017. Disponível em: https://support.micasense.com/hc/en-us/article_attachments/115004168274/RedEdge-M_User_Manual.pdf. Acesso em: 3 ago. 2024.
- MITCHELL, J. E. *Combining photogrammetry and remote sensing for enhanced geospatial analysis*. *International Journal of Remote Sensing*, v. 40, n. 12, p. 4567-4583, 2019.
- MODESTO JÚNIOR, M. de S. M.; ALVES, R. N. B. (Ed.). **Cultura da mandioca: aspectos socioeconômicos, melhoramento genético, sistemas de cultivo, manejo de pragas e doenças e agroindústria**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. 257 p. ISBN 978-85-7035-621-5.
- MORRIS, C. D.; MENG, Z. *Brightness Index for urban land cover classification: A case study*. *Urban Remote Sensing*, v. 12, p. 55-67, 2018.
- MONTÓRIO, A. G.; CONSTANTIN, J.; VELINI, E. D.; MONTÓRIO, T. **Metodologia para estudo de seletividade de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp)**. *Revista Brasileira de Herbicidas*, [S.l.], v. 4, n. 2, p. 32 a 39, ago. 2005. ISSN 2236-1065.
- OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. **Mecanismos de ação de herbicidas**. In: OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Org.). *Biologia e manejo de plantas daninhas*. Curitiba: Omnipax Editora, 2011. p. 141-159.
- OLIVEIRA, T. de. **Levantamento, dose resposta e manejo de biótipos de capim-amargoso (*Digitaria insularis*) com potencial de resistência múltipla a herbicidas inibidores da EPSPs e ACCase**. 2020. 71 p. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Piracicaba, 2020. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-30042020-083233/publico/Thiago_de_Oliveira_versao_revisada.pdf. Acesso em: 3 ago. 2024.
- PADOLFI, A.S.; RAMALDES, G.P.; SANTOS, O.L.dos. **Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT**. *Revista Científica da FAESA*, v.14,n.1, p.145-165, 2018.
- PEIXOTO, J. V. M. **Fenotipagem por imagem, estimativas de parâmetros genéticos e índices de seleção em alface biofortificada**. 2020. 103 p. Tese (Título de Doutora pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
- PEREIRA, L. M. Seleção de genótipos de alfaces verdes biofortificadas por meio do uso da técnica de fenotipagem por imagem. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, Monte Carmelo, 2020.
- PEREIRA, L. da S.; SILVA, D. de O.; PAMBOUKIAN, S. V. D. **Sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão no cultivo de bambu**. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 16, n. 1, 2017. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/9972>. Acesso em: 10 set. 2024.
- PERESSIN, V. A. *et al.* **Manejo integrado de plantas daninhas em mandioca: um desafio ambientalmente correto**. Campinas - SP, 2022. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/publicacoes/iac_livro_mandioca.pdf. Acesso em: 3 ago. 2024.
- POTTS, S. G. *et al.* **Global pollinator declines: impacts on crops and ecosystems**. *Science*, v. 344, n. 6188, p. 1371-1376, 2014.

- QIAN, C., SHAO, L., HOU, X., ZHANG, B., CHEN, W., XIA, X. **Detection and attribution of vegetation greening trend across distinct local landscapes under China's Grain to Green Program: A case study in Shaanxi Province.** *Catena*, v.183, p. 1-10, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104182.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. **Distinguishing vegetation from soil background information.** *Photogrammetric engineering and remote sensing*, v. 43, n. 12, p. 1541-1552, Weslaco, TX 78596, 1977.
- RODRIGUEZ, J. *et al.* **Application of brightness index for monitoring land cover changes in arid environments.** *International Journal of Remote Sensing*, v. 30, n. 10, p. 2523-2542, 2009.
- ROOSEVELT, A. C *et al.* **Paleoindian cave dwellers in the amazon: the peopling of the americas.** *Science, New Series*, Vol 272, No.5260, (Apr. 19, 1996), p.373-384. DOI:10.1126/science.272.5260.373.
- SANKARAN, S.; KHOT, L. R.; ESPINOZA, C. Z.; JAROLMASJED, S.; SATHUVALLI, V. R.; VANDEMARK, G. J.; MIKLAS, P. N.; CARTER, A. H.; PUMPHREY, M. O.; KNOWLES, N. R.; PAVEK, M. J. **Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: a review.** *European Journal of Agronomy*, v. 70, p. 112-123, 2015. DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.
- SATAPATHY, B.; ANSHUMAN, J.; KRUPARANI, P. **Drone techonology in agriculture: an overview.** *Vigyan Varta*, vol 5, issue 4, e-issn: 2582-9467, p. 159-164, 2024.
- SILVA, F. M. L.; ABREU, M. L. de.; BRACHTVOGEL, E. L.; CURCELLI, F.; GIMENES, M. J.; LARA, A. C. da C. **Moléculas de herbicidas seletivas à cultura da mandioca.** *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 3, n. 2, p. 61-72, 2009.
- SILVA, D. V.; SANTOS, J. B. dos; SILVEIRA, H. M.; CARVALHO, F. P. de; CASTRO NETO, M. D.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. A.; CECON, P. R. **Tolerância de cultivares de mandioca aos herbicidas fomesafen e fluazifop-p butil.** *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 10, n. 3, p. 219-231, set./dez. 2011. ISSN 2236-1065.
- SILVA, L. S.; ZANONI, V. A. G.; PAZOS, V. C.; SANTOS, L. M. A.; JUCÁ, T. R. P. **Fotogrametria com imagens adquiridas com drones: do plano de voo ao modelo 3D.** *Brasília, DF: LaSUS FAU: Editora Universidade de Brasília*, 2022. PDF. ISBN 978-65-84854-00-0. DOI: 10.29327/563260.
- SILVA, J. **Fundamentos de fotogrametria.** São Paulo: Editora Técnica, 2010.
- SHANER, D. L. **Herbicide handbook.** 10th Edition. *Weed Science Society of America*, 2014.
- SMITH, J. A. **Advances in drone-based photogrammetry.** *Journal of Remote Sensing*, 2021.
- SOARES DE MOURA, S. M. (Org.). **Estudos sobre sensoriamento remoto, cartografia e geoprocessamento.** Volume 1, Belo Horizonte, MG: Poisson, 2021. PDF. ISBN 978-65-5866-087-3. DOI: 10.36229/978-65-5866-087-3.
- SBCPD (SOCIEDADE BRASILEIRA DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS). **Boletim Informativo - SBCPD/Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas.** v. 10, Suplemento, maio 2004. São Paulo: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2002. ISSN 1679- 0901.
- SBCPD (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS). **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas.** Londrina, 1995. 42 p.

SOUSA, A. F. de; CUNHA, B. A. D. B. da; MARTINS, P. K.; MOLINARI, H. B. C.; KOBAYASHI, A. K.; JÚNIOR, M. T. S. **Nova abordagem para a fenotipagem de plantas: conceitos, ferramentas e perspectivas.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 08, número especial do IV SMUD, p. 660-672, 2015.

SOUZA, M.; PEREIRA, A. **Sensoriamento remoto e suas aplicações.** Rio de Janeiro: EdUFRJ, 2015.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao sensoriamento remoto.** [s. d.]. Disponível em: <<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 28 ago. 2024.

SOUZA, L. da S.; FARIAS, A.R.N.; MATTOS, P.L.P. de; FUKUDA, W.M.G. (Ed.). **Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca.** Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. p. 139-162.

TAKAHASHI, M.; GONÇALO, S. **A cultura da mandioca.** Paranaíba: Olímpica, 2005. 116 p.

TEMBA, P. **Fundamentos de fotogrametria.** Geoprocessamento. Belo horizonte: Departamento de Cartografia, UFMG, 2000, 26 p.

TOMASELLI, A. M. *et al.* **Using the brightness index to analyze forest canopy cover changes.** *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 7, n. 1, p. 073541, 2013.

TOMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F. C. da; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. **Fotogrametria: aplicações a curta distância.** In: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. (Organizadores), FCT 40 anos, Perfil Científico-Educacional. Presidente Prudente, SP, p. 147-159, 1999.

TORRES-SANCHEZ, J.; LOPEZ-GRANADOS, F.; DE CASTRO, A. I.; PEÑA, J. M. **An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: application for vegetation detection in herbaceous crops.** *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 114, p. 43-52, 2015.

TUCKER, C. J. **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.** *Remote Sensing of Environment*, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.

VALLE, T. L.; LORENZI, J. O. **Variedades melhoradas de mandioca como instrumento de inovação, segurança alimentar, competitividade e sustentabilidade: contribuições do Instituto Agronômico de Campinas (IAC).** Brasília, DF, 2014. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/19441/12566>. Acesso em: 2 ago. 2024.

VÍTOR, L. A. *et al.* **Produtividade e qualidade das raízes da mandioca em função de diferentes épocas de colheita.** [s.l.], 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Luane/Desktop/Mestrado%20Final%20-%20agosto24/Mandioca%20-%20Pesquisas/96-Texto%20do%20artigo-629-1-10-20160611.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2024.

VELINI, E. D.; OSIPE, R.; GAZZIERO, D. L. P. (coord.). **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas.** Londrina: Embrapa Amazônia Ocidental. Embrapa Soja, 1995. 42 p.

VISSES, F. de A., SENTELHAS, P.C., PEREIRA, A. B. **Yield gap of cassava crop as a measure of food security – an example for the main Brazilian producing regions.** *Food Sec.* 10, 1191-1202 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0831-2>.

WALTER, A.; LIEBISCH, F.; HUND, A. ***Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis***. *Plant Methods, London*, v. 11, n. 14, p. 1-11, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1186/s13007-015-0056-8>.

WANG, B.; YANG, C.; ZHANG, J.; YOU, Y.; WANG, H.; YANG, W. ***IHUP: an integrated high-throughput universal phenotyping software platform to accelerate Unmanned-Aerial-Vehicle-based field plant phenotypic data extraction and analysis***. *Plant Phenomics*. 2024;6:0164. DOI:10.34133/plantphenomics.0164.

WANG, Z. *et al.* ***Performance of the Green Line Index for detecting chlorophyll content and assessing plant health in remote sensing studies***. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 12, n. 1, p. 015006, 2018.

Xie, J.; Zhou, Z.; Zhang, H.; Zhang, L.; Li, M. ***Combining canopy coverage and plant height from UAV-Based RGB images to estimate spraying volume on potato***. *Sustainability* 2022, 14, 6473.

ZARCO-TEJADA, P.J.; RUEDA, C.A.; USTIN, S.L. ***Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods***. *Remote Sensing of Environment*, v.85, n.1, p.109-124, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S00344257\(02\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S00344257(02)00197-9).

ZHENG, H. B.; CHENG, T.; ZHOU, M.; LI, D.; YAO, X.; TIAN, Y. C.; CAO, W. X.; ZHU, Y. ***Improved estimation of rice aboveground biomass combining textural and spectral analysis of UAV imagery***. *Precision Agriculture*, v. 20, n. 3, p. 611-629, jun. 2019. DOI: 10.1007/s11119-018-9600-7.

ZHAO, H. *et al.* ***Evaluation of the Green Line Index (GLI) for monitoring plant health and stress in agricultural crops***. *Remote Sensing*, v. 11, n. 16, p. 1914, 2019.

ZHENG, H. *et al.* ***Improved estimation of rice aboveground biomass combining textural and spectral analysis of UAV imagery***. *Precision Agriculture*, v.20, n.3, p.611-629, 2019.