

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

ANÁLISE RADIOGRÁFICA E MULTIESPECTRAL NA
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE
Handroanthus impetiginosus

Autora: Alessandra Mathias Oliveira

Orientadora: Profa. Dra. Juliana de Fátima Sales

RIO VERDE - GO
Março – 2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

ANÁLISE RADIOGRÁFICA E MULTIESPECTRAL NA
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SEMENTES DE
Handroanthus impetiginosus

Autora: Alessandra Mathias Oliveira
Orientadora: Profa. Dra. Juliana de Fátima Sales
Coorientadores: Prof. Dr. Arthur Almeida
Rodrigues
Dra. Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia - do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde – Agronomia.

RIO VERDE - GO
Março – 2026

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 **ALESSANDRA MATHIAS OLIVEIRA**
Data: 19/03/2026 08:59:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **JULIANA DE FATIMA SALES**
Data: 25/03/2026 09:44:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 23/2026 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

Ata nº 240/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**ATA Nº/240
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Ao décimo primeiro dia do mês de março do ano de dois mil e vinte e seis, às 7:30h, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Profª. Dra. Juliana de Fátima Sales (Presidente), Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno), Prof. Dr. Arthur Almeida Rodrigues (Avaliador interno), Profª. Dra. Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva (Avaliadora externa), sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada no IF Goiano - Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de ALESSANDRA MATHIAS OLIVEIRA discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora Profª. Dra. Juliana de Fátima Sales, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida a autora da Dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu a examinada, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA**, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, eu, Marconi Batista Teixeira, coordenador do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Profª. Dra. Juliana de Fátima Sales (Presidente)
Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno)
Prof. Dr. Arthur Almeida Rodrigues (Avaliador interno)
Profª. Dra. Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva (Avaliadora externa)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Juliana de Fatima Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/03/2026 09:32:31.
- **Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva, Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Lavras (22078679000174)**, em 11/03/2026 09:39:29.
- **ARTHUR ALMEIDA RODRIGUES, ARTHUR ALMEIDA RODRIGUES - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500)**, em 11/03/2026 09:39:55.
- **Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCMDAGRO-R**, em 11/03/2026 10:50:35.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 798646

Código de Autenticação: 225274691a



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 60/2026 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ANÁLISE RADIOGRÁFICA E MULTIESPECTRAL NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE
SEMENTES DE *Handroanthus impetiginosus* Mattos

Autora: Alessandra Mathias Oliveira

Orientador: Profa. Dra. Juliana de Fátima Sales

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de Concentração em Produção Vegetal
Sustentável no Cerrado

APROVADA em 11 de março de 2026.

Prof^ª. Dra. Juliana de Fátima Sales (Presidente)

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno)

Prof. Dr. Arthur Almeida Rodrigues (Avaliador interno)

Prof^ª. Dra. Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva (Avaliadora externa)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Juliana de Fatima Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO**, em 11/03/2026 09:34:52.
- **Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva, Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Lavras (22078679000174)**, em 11/03/2026 09:40:05.
- **ARTHUR ALMEIDA RODRIGUES, ARTHUR ALMEIDA RODRIGUES - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500)**, em 11/03/2026 09:40:12.
- **Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCMDAGRO-R**, em 11/03/2026 10:41:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 798726

Código de Autenticação: 1f7baf85f4



Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

“...e tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração, como ao
Senhor, e não aos homens...” Colossenses 3:23

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus, meu refúgio e fortaleza, minha gratidão infinita. Agradeço por Sua presença constante em cada etapa desta jornada, por ter me sustentado nos momentos de cansaço e incerteza, e por ter iluminado meu caminho com Sua sabedoria. Reconheço que cada conquista alcançada é fruto de Sua graça e misericórdia. Obrigado, Senhor, por não me deixar desistir, por renovar minhas forças quando me faltavam, e por conceder a capacidade, a perseverança e a oportunidade de chegar até aqui. Toda honra e glória sejam dadas a Ti, pois sem Tua provisão e direção, nada disso seria possível.

Ao meu esposo, Edimar Jhunyor, meu maior incentivador e companheiro de todas as horas, minha gratidão profunda e sincera. Obrigada por acreditar em mim quando eu mesma duvidei, por me encorajar nos momentos de desânimo e por celebrar cada pequena vitória ao meu lado. Seu apoio incondicional, sua paciência e compreensão quando tive que me ausentar para seguir esse sonho foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Você esteve presente em cada desafio, oferecendo palavras de ânimo, um abraço reconfortante e a certeza de que eu era capaz. Esta conquista também é sua, pois sem você ao meu lado, o caminho teria sido muito mais difícil. Obrigada por ser meu porto seguro.

Um agradecimento especial à minha mãe Aline e à minha avó Francisca, que são exemplos de mulheres guerreiras, de fé, que sempre vão à luta. Obrigada por me ensinarem com atitudes e por me mostrarem sempre o meu valor.

Agradeço à minha irmã mais nova, Ana Júlia, que mesmo pequena participou de algumas etapas deste sonho, ajudando-me na parte experimental quando possível e por ser minha companhia em vários dias durante as viagens. Espero que isso sirva de exemplo para nunca desistir dos seus sonhos. Ao meu irmão Felipe, que também, mesmo muito pequeno, orgulha-se de mim e fortalece com seu abraço aconchegante.

À minha orientadora, Dra. Juliana Sales, agradeço pela disponibilidade desde o primeiro dia, por confiar no meu trabalho e por sempre ter uma palavra de ânimo e motivação. Sua humanidade e generosidade fizeram muita diferença neste percurso.

Aos meus coorientadores, Dr. Arthur e Dra. Ingrid Maressa, agradeço a paciência, o acolhimento e a bondade com que sempre se dispuseram a ajudar-me, por ouvirem cada dúvida e por apontarem uma direção. Sempre me lembrarei de vocês com carinho e gratidão.

A toda equipe do Laboratório de Sementes, Ana, Daniely, Klara, Rafael e Merilayne, agradeço pelas ajudas nos experimentos, pelas conversas descontraídas e por tornarem o ambiente mais leve.

À minha grande amiga e colega de pós-graduação, Natasha, e à sua mãe Josi, que me acolheram com tanto carinho e amor em sua casa, pelas inúmeras horas de conversas, pelos lanches e doces que fizeram essa jornada fazer sentido. Apenas Deus pode retribuir tamanha generosidade de vocês. Levarei para sempre em meu coração com muita gratidão.

Aos meus também amigos de pós-graduação, Anny, Pollyana, Jordana, Danilo obrigada por compartilharem esse momento e fazerem com que a jornada fosse mais leve.

Às minhas amigas Bruna e Milena, que mesmo distantes sempre torceram e vibraram por cada conquista minha, ouviram minhas dificuldades e acreditaram em mim. A presença física de vocês fizeram muita falta.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, pela concessão da oportunidade de realizar este curso de pós-graduação.

Ao Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, especialmente ao Adinan Alves, pela colaboração constante e pelas contribuições valiosas ao longo desta pesquisa.

Ao Laboratório de Anatomia Vegetal, na pessoa de Roque, que se dispôs a colaborar na parte experimental com toda paciência e presteza para que esta pesquisa desse certo, e também ao Laboratório de Cultura de Tecidos pelo fornecimento dos equipamentos.

A todo corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, agradeço pelo conhecimento transmitido e pelo profissionalismo de cada um.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Prof. Dr. Marconi, pela prontidão e pelo exemplo de profissional. Seu comprometimento e alegria fazem com que a pesquisa seja satisfatória.

À Dra. Clissia Barboza, do Laboratório de Radiologia Nuclear do CENA – USP, que me acolheu com generosidade para a realização de parte das análises desta pesquisa. Agradeço imensamente por sua disponibilidade, pela partilha de conhecimentos e pelo suporte técnico essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para o enriquecimento científico desta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela concessão da bolsa.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Alessandra Mathias Oliveira, filha de Aline de Oliveira e Silva e Alan Mathias de Siqueira, esposa de Edimar Gonçalves Jhunyor, nasceu no dia 15 de março de 2001, em Palmeiras de Goiás – Goiás. Em 2018 ingressou na graduação de Bacharelado em Agronomia na Universidade Estadual de Goiás - Campus Palmeiras de Goiás, na qual atuou em projetos de pesquisa na área de grandes culturas como arroz e algodão, como bolsista no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), e diplomou-se em 2023. Em 2024, iniciou no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia pelo Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, área de concentração em Tecnologia de sementes e linha de pesquisa em Fisiologia, bioquímica e pós-colheita de produtos vegetais, no qual desenvolveu estudos com qualidade fisiológica e técnicas de avaliação por imagem em sementes, como bolsista da instituição CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Em março de 2025 submeteu-se à defesa da dissertação, requisito indispensável para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias - Agronomia.

ÍNDICE GERAL

Página

LISTA DE TABELAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	10
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
1. Introdução	15
2. Material e Métodos	16
2.2 Material Vegetal	16
2.2 Morfologia interna e caracterização de sementes através dos raios X.....	16
2.3 Análise de imagens multiespectrais.....	17
2.4 Parâmetros físicos e fisiológicos das sementes.....	18
2.5 Trocas Gasosas.....	19
2.6 Clorofila A e B.....	20
2.7 Análise Estatística	20
3. Resultados.....	22
4. Discussão.....	32
5. Conclusão.....	36
6. Referências.....	37

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. As variáveis obtidas foram:.....	18
Tabela 2. Distribuição das sementes de ipê-roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>) nas classes radiográficas por repetição, expressa em porcentagem.....	23
Tabela 3. Autovalores e variância explicada pelos quatro componentes principais extraídos pela PCA.....	25
Tabela 4. Correlações das variáveis com os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) e respectivos valores de $\cos^2$	26
Tabela 5. Contribuição percentual das principais variáveis para a formação dos três primeiros componentes principais.....	28

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Prancha radiográfica das sementes de ipê-roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>) classificadas em três classes segundo o grau de preenchimento da cavidade embrionária. Classe 1 (A, B): cavidade preenchida >50%; Classe 2 (C, D, E): cavidade preenchida ≤50%; Classe 3 (F, G): cavidade vazia. Setas e elipses pontilhadas indicam as regiões de danos e preenchimentos.....	22
Figura 2. Sementes de Classe 1 de <i>Handroanthus impetiginosus</i> : (A) imagens radiográficas mostrando cavidade embrionária plenamente preenchida; (B) plântulas normais correspondentes oriundas dessas sementes (escala: 1 cm).....	23
Figura 3. Sementes de Classe 2 de <i>Handroanthus impetiginosus</i> : (A) imagens radiográficas com preenchimento parcial da cavidade embrionária; (B) plântulas anormais correspondentes, com deformações morfológicas diversas.....	23
Figura 4. Sementes de Classe 3 de <i>Handroanthus impetiginosus</i> : (A) imagens radiográficas evidenciando cavidade embrionária completamente vazia, com tonalidade escura e ausência de estruturas internas visíveis; (B) aspecto externo das sementes correspondentes.....	24
Figura 5. Imagens multiespectrais de sementes classificadas quanto à viabilidade. (A–C) Imagens em escala de cinza (Grayscale); (D–F) banda 880 nm; (G–I) banda 940 nm; (J–L) banda 970 nm. Coluna 1: sementes viáveis (A, D, G, J); Sementes inviáveis (B, E, H, K); Sementes vazias (C, F, I, L).....	26
Figura 6. Scree plot da Análise de Componentes Principais, indicando a porcentagem de variância explicada por cada componente. CP1 = 43,6%; CP2 = 27,4%; CP3 = 16,2%; CP4 12,8%.....	27
Figura 7. Gráfico de cos ² das variáveis nos dois primeiros componentes principais (Dim 1-2), representando a qualidade de representação de cada variável nos eixos fatoriais.....	30

Figura 8. As coordenadas dos cinco lotes de sementes nos eixos principais e suas respectivas contribuições percentuais para a formação de cada componente são apresentadas na Tabela 5.....	31
Figura 9. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos cinco lotes de sementes de ipê-roxo, mostrando simultaneamente a dispersão dos lotes (R1–R5) e os vetores das variáveis agrupados por categoria.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/sigla	Significado	Unidades
$\approx$	Aproximadamente	-
%	Porcentagem	-
$\pm$	Mais ou menos	-
$>$	Maior	-
$<$	Menor	-
$\leq$	Menor ou igual	-
=	Igual	-
**	Significativo a 1% de significância	-
*	Significativo a 5% de significância	-
Ns	Não significativo	-
A	Taxa de assimilação líquida de CO ₂	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A/Ci	Eficiência instantânea de carboxilação	-
CENA	Centro de Energia Nuclear na Agricultura	-
Ci/Ca	Relação entre concentração interna e externa de CO ₂	-
Cm	Centímetro	Cm
CO ₂	Dióxido de carbono	-
cos ²	Cosseno quadrado	-
CP	Componente Principal	-
E (Emm)	Taxa de transpiração	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
FWHM	Largura à meia altura	nm
G	Grama	G
GLN	Desuniformidade do nível de cinza	-
GLRLM	Matriz de comprimento de corrida por nível de cinza	-
Gsw	Condutância estomática ao vapor d'água	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
h	Hora	H
HGRE	Ênfase de corrida de nível de cinza alto	-
ICF	Índice de Clorofila Falker	-
IRGA	Analizador de gases por infravermelho	-

Símbolo/sigla	Significado	Unidades
kV	Quilovolt	kV
LDA	Análise discriminante linear	-
LGRE	Ênfase de corrida de nível de cinza baixo	-
LRE	Ênfase de corrida longa	-
mg	Miligrama	mg
mm	Milímetro	mm
mm ²	Milímetro quadrado	mm ²
nCDA	Análise discriminante canônica normalizada	-
NIR	Infravermelho próximo	-
nm	Nanômetro	nm
PCA	Análise de componentes principais	-
pixels	Unidade de imagem digital	-
PPFD	Densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
r	Coefficiente de correlação	-
RLN	Desuniformidade de comprimento de corrida	-
ROI	Região de interesse	-
RP	Porcentagem de corridas	-
SRE	Ênfase de corrida curta	-
UEG	Universidade Estadual de Goiás	-
UV	Ultravioleta	-
VIS	Visível	-
XP	Xylidine Ponceau	-
μm	Micrômetro	μm
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Micromol por metro quadrado por segundo	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$\mu\text{mol mol}^{-1}$	Micromol por mol	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
$\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$	Microsiemens por centímetro por grama	$\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$

RESUMO

OLIVEIRA, ALESSANDRA MATHIAS. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde – GO, março de 2026. **Análise radiográfica e multiespectral na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Handroanthus impetiginosus***. Orientadora: Profa. Dra. Juliana de Fátima Sales. Coorientadores: Dr. Arthur Almeida Rodrigues e Profa. Dra. Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva.

As técnicas de análise de imagens são alternativas não destrutivas, rápidas e objetivas para a avaliação da qualidade de sementes florestais. A falta de métodos rápidos e que não comprometam a semente, para avaliação da qualidade fisiológica de sementes florestais dificulta a eficiência dos programas de reflorestamento e conservação. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade de sementes de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) utilizando as técnicas de análise de imagens de raios X e multiespectrais, integradas a parâmetros fisiológicos e morfométricos, a fim de validar essas metodologias complementares. Inicialmente, com as sementes identificadas e enumeradas, foram obtidas imagens radiográficas para classificação das sementes em três classes segundo o grau de preenchimento da cavidade embrionária. Posteriormente, com as mesmas sementes, realizou-se a aquisição das imagens multiespectrais nas bandas do infravermelho próximo (NIR), especialmente 880, 940 e 970 nm, que se mostraram as mais determinantes para a separação dos lotes. Com as plântulas oriundas do teste de emergência, realizou-se a análise de trocas gasosas e a medição de clorofila A e B. Também foram conduzidos testes de germinação, comprimento de plântula e condutividade elétrica. Na sequência, realizou-se análise multivariada dos dados por meio de Análise de Componentes Principais (PCA). Concluiu-se que 80% das sementes avaliadas apresentaram cavidade embrionária preenchida em mais de 50% (Classe 1), correspondendo às sementes que originaram plântulas normais, enquanto sementes com preenchimento parcial ou ausente associaram-se a plântulas anormais e sementes inviáveis, respectivamente. As sementes viáveis apresentaram menor refletância nas bandas NIR, padrão associado ao maior conteúdo de lipídeos nos tecidos. A PCA integrou de forma eficiente as variáveis espectrais, germinativas e fotossintéticas, explicando 70,98% da variância total nos dois primeiros componentes, com destaque para as correlações expressivas entre a ênfase de corrida de nível de cinza baixo (LGRE, $r = -0,959$) e a emergência de plântulas ($r = -0,934$) com o CP1. Essa triagem de alta eficiência posiciona as técnicas avaliadas como ferramentas objetivas para programas de reflorestamento e conservação de espécies nativas do Cerrado, conectando diretamente a qualidade fisiológica das sementes ao seu potencial de estabelecimento em campo.

Palavras-chave: Vigor; Multiespectral; Radiografia de raios X; Nativas do Cerrado; PCA.

ABSTRACT

OLIVEIRA, ALESSANDRA MATHIAS. Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano - Campus Rio Verde - GO, March 2026. **Radiographic and multispectral analysis in the evaluation of the physiological quality of *Handroanthus impetiginosus* seeds.** Advisor: Prof. Dr. Juliana de Fátima Sales. Co-advisors: Dr. Arthur Almeida Rodrigues and Prof. Dr. Ingrid Maressa Hungria de Lima e Silva.

Image analysis techniques are non-destructive, rapid, and objective alternatives to evaluate the quality of forest seeds. The lack of fast methods that do not compromise the seed for assessing the physiological quality of forest seeds hinders the efficiency of reforestation and conservation programs. Thus, the objective of this work was to evaluate the quality of purple ipe seeds (*Handroanthus impetiginosus*) using X-ray and multispectral image analysis techniques, integrated with physiological and morphometric parameters, to validate these complementary methodologies. Initially, with the seeds identified and numbered, radiographic images were obtained to classify the seeds into three classes according to the degree of filling of the embryonic cavity. Subsequently, with the same seeds, multispectral images were acquired in the near-infrared bands (880, 940, and 970 nm). With the seedlings from the emergence test, gas exchange analysis and chlorophyll A and B measurement were performed. Tests such as germination, seedling length, and electrical conductivity were also carried out. Subsequently, multivariate analysis of the data was performed using Principal Component Analysis (PCA). It was concluded that 80% of the evaluated seeds presented embryonic cavity filled by more than 50% (Class 1), corresponding to seeds that originated normal seedlings, while seeds with partial or absent filling were associated with abnormal seedlings and non-viable seeds, respectively. Viable seeds showed lower reflectance in NIR bands, a pattern associated with higher lipid content in tissues, and PCA efficiently integrated spectral, germinative, and photosynthetic variables, explaining 70.98% of the total variance in the first two components.

Keywords: Vigor. Multispectral. Cerrado Native Species. Non-destructive.

1. INTRODUÇÃO

Handroanthus impetiginosus (Mart. ex DC.) Mattos, pertencente à família Bignoniaceae e popularmente conhecida como ipê-roxo, pau-d'arco-roxo e piúva, é uma árvore caducifolia e heliófila de médio a grande porte, com altura variando de 8 a 30 metros e diâmetro do tronco de 60 a 100 cm, tronco retilíneo, copa arredondada irregular, casca pardo-escura a negra externamente, ritidoma espesso e fissurado longitudinalmente (COSTA *et al.*, 2024). A floração ocorre entre maio e agosto, antes da emissão foliar, com flores róseo-violáceas reunidas em panícula subcorimbiforme, e os frutos são cápsulas lineares deiscentes de 25 a 30 cm, contendo sementes cordiformes, aladas, ortodoxas, com germinação epígea foliáceo fanerocotiledonar iniciada ao décimo terceiro dia após a semeadura (FELIX *et al.*, 2018).

A degradação ambiental provocada pela expansão agrícola, urbanização e exploração madeireira tem gerado crescente preocupação quanto à conservação da biodiversidade e à necessidade de restauração de áreas degradadas no Brasil. Nesse cenário, a recuperação de ecossistemas naturais depende fundamentalmente da disponibilidade de sementes de espécies nativas com elevada qualidade fisiológica, que assegurem o estabelecimento adequado de plântulas, a uniformidade de estande e a sobrevivência das mudas em campo (BRANCALION *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2020).

Entre as espécies florestais de interesse para programas de reflorestamento e conservação, o ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus* Mattos) destaca-se pela ampla distribuição geográfica, plasticidade ecológica e múltiplas aplicações econômicas, incluindo uso madeireiro, paisagístico, medicinal e ornamental (ZHANG *et al.*, 2020; ROSSI *et al.*, 2024). Além dessas aplicações, o ipê-roxo desempenha papel ecológico fundamental no bioma Cerrado, contribuindo para a manutenção da estrutura das florestas estacionais, para a dispersão de fauna e para a resiliência dos ecossistemas degradados. A dificuldade em obter lotes de sementes com alta qualidade fisiológica para programas de restauração, aliada à elevada variabilidade natural entre matrizes e à ausência de protocolos padronizados de análise para esta espécie, reforça a necessidade de métodos rápidos e não destrutivos de avaliação.

A qualidade de sementes é um dos principais fatores determinantes do sucesso de programas de produção de mudas e de projetos de recuperação florestal, exercendo influência direta sobre a taxa de germinação, o vigor das plântulas, a velocidade de emergência e a uniformidade do estande (FILHO, 2015; SILVA *et al.*, 2024). Entretanto,

esses métodos apresentam limitações importantes, incluindo a natureza destrutiva dos testes, a subjetividade na interpretação de resultados, o tempo prolongado necessário para obtenção de dados e a dependência de condições ambientais controladas (ELMASRY *et al.*, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, a avaliação da qualidade fisiológica de sementes baseia-se em testes padronizados, como germinação, tetrazólio, envelhecimento acelerado, condutividade elétrica e emergência de plântulas, os quais fornecem informações fundamentais sobre viabilidade, vigor e potencial de armazenamento (BRASIL, 2025).

Entretanto, esses métodos apresentam limitações importantes, incluindo a natureza destrutiva dos testes, a subjetividade na interpretação de resultados, o tempo prolongado necessário para obtenção de dados e a dependência de condições ambientais controladas (ELMASRY *et al.*, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a avaliação visual de danos morfológicos em sementes florestais nem sempre permite detectar defeitos internos, malformações embrionárias ou estágios iniciais de deterioração, comprometendo a precisão na predição do desempenho germinativo e do vigor das plântulas (GAGLIARDI, 2011).

Diante dessas limitações, as técnicas de análise de imagens têm emergido como alternativas promissoras para a caracterização não destrutiva, rápida e objetiva da qualidade de sementes. Entre as tecnologias disponíveis, destacam-se a análise de raios X e a análise de imagens multiespectrais, as quais fornecem informações complementares sobre a morfologia interna, a composição bioquímica e o estado fisiológico das sementes (DAI *et al.*, 2026; MORTENSEN *et al.*, 2021).

A radiografia de raios X permite a visualização de estruturas internas das sementes, como embrião, endosperma, tegumento e cavidades, possibilitando a identificação de danos mecânicos, malformações, vazios, rachaduras e presença de insetos sem causar danos às sementes (MEDEIROS *et al.*, 2021; MELO *et al.*, 2024). Por sua vez, a análise multiespectral utiliza a reflectância de sementes em diferentes comprimentos de onda, abrangendo desde o ultravioleta (UV) até o infravermelho próximo (NIR), permitindo avaliar características bioquímicas e fisiológicas, como teor de clorofila, proteínas, lipídeos, amido e conteúdo de água (MEDEIROS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2022).

Embora técnicas de análise de imagens, como a radiografia por raios X e o imageamento multiespectral, tenham demonstrado potencial na avaliação não destrutiva da qualidade de sementes em espécies agrícolas, ainda são escassas as investigações com espécies florestais nativas. Sementes de espécies nativas, como o ipê-roxo, frequentemente

possuem tegumentos opacos ou estruturas internas complexas, dificultando a avaliação pelos métodos tradicionais e torna a análise de imagens especialmente relevante para esse grupo. A complementaridade entre as duas abordagens de imagem reside justamente na capacidade de prever o desempenho fisiológico das sementes de maneiras distintas e integráveis: enquanto a radiografia por raios X permite inferir o potencial germinativo a partir da integridade estrutural do embrião — com sementes de cavidade plenamente preenchida (Classe 1) originando plântulas normais com maior eficiência fotossintética —, o imageamento multiespectral acessa indiretamente a composição bioquímica dos tecidos, com os parâmetros de textura espectral LGRE e HGRE, derivados da Matriz de Comprimento de Corrida por Nível de Cinza (GLRLM), apresentando correlação direta com a emergência de plântulas. Hipotetiza-se, portanto, que a integração dessas duas tecnologias com os testes fisiológicos convencionais permite a caracterização mais completa e robusta da qualidade das sementes, superando as limitações individuais de cada método. Por esse motivo, este estudo tem o objetivo de validar a aplicação dessas metodologias para *Handroanthus impetiginosus*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

O experimento foi realizado com um lote de sementes de Ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*), oriundos do campo experimental da Universidade Estadual de Goiás (UEG) - 29°43' S; 53°43' W e altitude de 670 m. As sementes foram coletadas em agosto de 2025 e armazenadas em câmara fria (BOD) a 10°C até dezembro de 2025, quando se iniciaram as análises experimentais. Esse período e condição de armazenamento são relevantes pois influenciam diretamente parâmetros como a condutividade elétrica e o vigor das sementes. As análises foram conduzidas nos Laboratórios de Sementes, Ecofisiologia Vegetal, Anatomia Vegetal e Cultura de Tecidos Vegetais do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde e no Laboratório de Radiologia Nuclear do Centro de Pesquisa Nuclear na Agricultura (CENA) – Piracicaba, São Paulo.

2.2 Morfologia interna e caracterização de sementes através dos raios X

As sementes foram submetidas à análise de raios X pelo equipamento “Faxitron HP”, modelo MultiFocus, no qual foram radiografadas 200 sementes, identificadas e

fixadas em grupos de 20 sementes em dez repetições, sobre uma placa de acetato transparente utilizando fita adesiva dupla face. As sementes foram expostas por 4,7 segundos a intensidade de radiação ajustado a 27 kv.

Após o registro, as imagens foram processadas e com base na interpretação das imagens radiográficas, observou-se a morfologia interna e externa, com isso classificou em três classes, segundo a metodologia de Silva *et al.*, 2024:

- Classe 1: Cavidade embrionária preenchida com mais de 50%;
- Classe 2: Cavidade embrionária preenchida até 50%;
- Classe 3: Cavidade embrionária vazia.

2.3 Análise de imagens multiespectrais

As sementes foram submetidas à análise de imageamento multiespectral utilizando o sistema VideometerLab 4™ (Videometer A/S, Herlev, Dinamarca), composto por uma esfera integradora de 300 mm de diâmetro com revestimento interno de titânio fosco para iluminação difusa e homogênea (NIELSEN *et al.*, 2014). O sistema possui 19 LEDs monocromáticos com comprimentos de onda entre 365 e 970 nm, abrangendo as regiões UV, visível e NIR, com largura de banda (FWHM) de 10-30 nm (BOELT *et al.*, 2018).

As sementes posicionadas em placas de acetato foram imageadas sequencialmente sob cada LED, com aquisição automatizada pelo software VideometerLab v.3.14.9. As imagens multiespectrais foram capturadas com resolução de 2.192×2.192 pixels ($\sim 40 \mu\text{m}/\text{pixel}$) em formato de 8 bits por canal, além de imagens RGB convencionais (CARSTENSEN; HANSEN, 2003). A calibração radiométrica foi realizada previamente usando amostras de referência.

O processamento incluiu segmentação automática das regiões de interesse (ROI) por limiarização (thresholding), com identificação individual das sementes como objetos binários (BLOB) (GONZALEZ; WOODS, 2018). Aplicou-se análise discriminante canônica normalizada (nCDA) para discriminação de classes, técnica multivariada supervisionada que maximiza a separação interclasses através de transformações lineares dos dados espectrais (MEDEIROS *et al.*, 2021; ELMASRY *et al.*, 2019).

Para cada semente, extraíram-se características espectrais médias nos 19 comprimentos de onda, valores de autofluorescência em 10 combinações excitação/emissão, e parâmetros morfométricos (área, perímetro, diâmetro equivalente, circularidade, alongamento e índices de forma) (POLDER *et al.*, 2019). Os dados foram

exportados em formato tabular para análises estatísticas subsequentes.

2.4 Parâmetros físicos e fisiológicos das sementes

Grau de umidade: determinado pelo método da estufa (Olidefcz, N1030, Brasil) a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 h com duas subamostras de 50 sementes e com resultados expressos em porcentagem (Brasil, 2025).

Peso de mil sementes: as sementes foram pesadas em balança analítica de precisão (AY220, Marte, Brasil) em quatro repetições de oito subamostras de 100 sementes (Brasil, 2025).

Germinação: foram utilizadas dez repetições contendo 20 sementes em cada repetição, sendo cinco repetições ao total. As sementes foram semeadas em rolo de papel do tipo *germitest*, que foi previamente umedecido com volume de água (mL) equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco (g). Após a semeadura, as amostras foram transferidas para câmara de germinação do modelo TE 402 (TECNAL, Brasil), e foram mantidas sob temperatura controlada de 25°C e com fotoperíodo de 24h.

A avaliação da germinação iniciou com a primeira contagem aos sete dias após a semeadura, momento em que foram contabilizadas todas as plântulas que apresentavam características normais de desenvolvimento. A contagem final foi realizada ao décimo quarto dia após a semeadura, encerrando o período de avaliação do teste de germinação, conforme estabelecido por Brasil (2025). Além das plântulas normais, foram identificadas e contabilizadas as plântulas anormais, sementes duras e as sementes mortas (Brasil, 2025).

Comprimento e massa seca de plântulas: utilizou-se dez plântulas por repetição oriundas do teste de germinação, realizando medidas da raiz primária e do hipocótilo da média de plântulas, utilizando uma régua. Os resultados médios por plântulas foram expressos em centímetros. Posteriormente, as mesmas plântulas foram levadas à estufa com circulação de ar forçada, mantida à temperatura de 65°C pelo período de 24 h. Após este período, a massa seca foi pesada em balança com precisão de 0,001g, e os resultados médios expressos em mg/plântula (Nakagawa, 1999).

Emergência de plântulas em areia: as sementes foram submetidas ao teste de emergência mantendo o posicionamento das sementes foi exatamente igual a distribuição na qual foram radiografadas. Primeiro, fez-se a preparação com o processo de

esterilização da areia, sendo levada em formas de alumínio, a estufa de circulação fechada a temperatura de 200°C por duas horas (BRASIL, 2025). Após esse processo, foram colocadas em três bandejas e semeadas, distribuídas em quatro quadrantes com 20 sementes, e em 2 cm de profundidade. A quantidade de água foi conforme o cálculo da capacidade de campo. A avaliação foi feita no vigésimo oitavo dia e os resultados expressos em porcentagem de emergência (Nakagawa, 1994).

Condutividade elétrica: foram utilizadas 4 repetições de 25 sementes, imersas em 75 mL de água deionizada, mantidas a 25°C por 6 horas, com resultados também expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ (FILHO et al. 2009). Após, utilizou-se um condutivímetro com eletrodo de constante 1.0 para a leitura (CG 1400, GEHAKA, Brasil) e os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ de semente (VIEIRA E KRZYZANOWSKI, 1999).

2.5 Trocas gasosas

As trocas gasosas foliares foram avaliadas utilizando analisador portátil de gases no infravermelho (IRGA), modelo (LI-6800, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). As medições foram realizadas em folhas completamente expandidas, sadias e localizadas no terço médio das plantas, no período da manhã, sob condições ambientais estáveis. Durante as leituras foram mantidas as seguintes condições padronizadas: Concentração de CO_2 : aproximadamente $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, fluxo de ar: $500 \mu\text{mol s}^{-1}$, temperatura da folha: próxima à temperatura ambiente, radiação fotossinteticamente ativa (PAR): $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, umidade relativa monitorada pelo sistema.

Tabela 1. As variáveis obtidas foram:

A	Taxa de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).
E	Taxa de transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).
Gsw	Condutância estomática ao vapor d'água ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).
Ci/Ca	Relação entre concentração interna e externa de CO_2 .
A/Ci	Eficiência instantânea de carboxilação.

Cada unidade experimental foi composta por uma folha por planta, sendo realizadas leituras após estabilização dos parâmetros no visor do equipamento.

2.6 Clorofila A e B

Para determinação do ICF a (Índice de Clorofila Falker) e ICF b, foi utilizada as mesmas plântulas da determinação das trocas gasosas, com o equipamento portátil clorofiLOG que estima clorofila de forma não destrutiva, medindo a radiação transmitida pela folha em três comprimentos de onda (dois no vermelho e um no infravermelho próximo) e calcula o índice proporcional à absorbância dos pigmentos. Tipicamente são citados ~635 nm, 660 nm e 880 nm. Utilizou-se plântulas do teste de emergência para realizar a determinação, escolhendo duas plântulas de cada repetição, sendo elas as mais saudáveis. Realizou-se a medição na parte da manhã para que essas plântulas não sofressem estresse hídrico/térmico. A leitura foi padronizada em folhas do terço médio.

A leitura com o ClorofiLOG deu-se por posicionar a folha na câmara do aparelho e fechar completamente a pinça para a leitura.

2.7 Análise estatística

A estrutura multivariada dos dados foi avaliada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), utilizando a função `PCA()` do pacote `FactoMineR` no ambiente R. A análise foi conduzida a partir da matriz de dados contendo as variáveis fisiológicas, morfológicas e espectrais avaliadas, com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e identificar os principais gradientes responsáveis pela variabilidade observada. A decomposição foi realizada por meio da técnica de decomposição em valores singulares, gerando componentes ortogonais que maximizam a variância explicada.

Foram obtidos os autovalores, a porcentagem de variância explicada individual e acumulada por cada componente, as coordenadas fatoriais dos indivíduos (scores), bem como as correlações das variáveis com os componentes principais. Adicionalmente, foram calculados os coeficientes de rotação (loadings), as contribuições percentuais das variáveis e dos indivíduos para cada dimensão e os valores de $\cos^2$, utilizados para avaliar a qualidade de representação das variáveis nos eixos fatoriais. A interpretação dos componentes considerou as variáveis com maiores contribuições e maiores correlações em cada dimensão, associadas a valores elevados de $\cos^2$.

A representação gráfica foi realizada por meio de *biplot* gerado com a função

`fviz_pca_biplot()` do pacote `factoextra`, considerando os dois primeiros componentes principais, permitindo a visualização simultânea da dispersão dos indivíduos e da contribuição das variáveis na formação dos eixos.

3. RESULTADOS

Caracterização da morfologia interna de sementes viáveis e inviáveis

As sementes apresentaram teor de água de 8,42% e peso de mil sementes de 104,5g. A análise radiográfica das sementes de ipê-roxo permitiu a visualização não destrutiva da morfologia interna das sementes e a classificação em três classes, de acordo com o grau de preenchimento da cavidade embrionária (Figura 1). A prancha radiográfica ilustra os padrões morfológicos característicos de cada classe: sementes com cavidade embrionária preenchida em mais de 50% (Classe 1, imagens A e B), sementes com preenchimento de até 50% (Classe 2, imagens C, D e E) e sementes com cavidade embrionária vazia (Classe 3, imagens F e G).

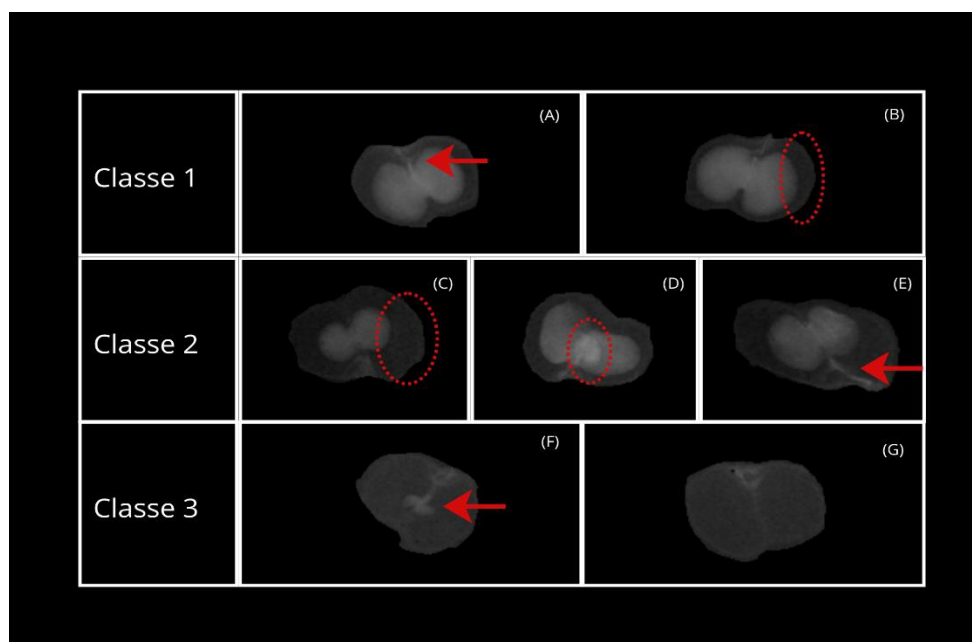


Fig 1. Prancha radiográfica das sementes de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) classificadas em três classes segundo o grau de preenchimento da cavidade embrionária. Classe 1 (A, B): cavidade preenchida $>50\%$; Classe 2 (C, D, E): cavidade preenchida $\leq 50\%$; Classe 3 (F, G): cavidade vazia. Setas e elipses pontilhadas indicam as regiões de danos e preenchimentos.

A relação entre a morfologia interna observada nas radiografias e o desempenho germinativo das plântulas é ilustrada nas Figuras 2 e 3. Sementes da Classe 1, com embrião bem formado e cavidade plenamente preenchida, originaram plântulas normais, com desenvolvimento radicular e hipocotiledonar uniforme e vigoroso (Figura 2). Sementes da Classe 2, com preenchimento parcial da cavidade embrionária, estiveram associadas ao desenvolvimento de plântulas anormais, com deformações na radícula, hipocótilo encurvado

ou desenvolvimento incompleto (Figura 3).

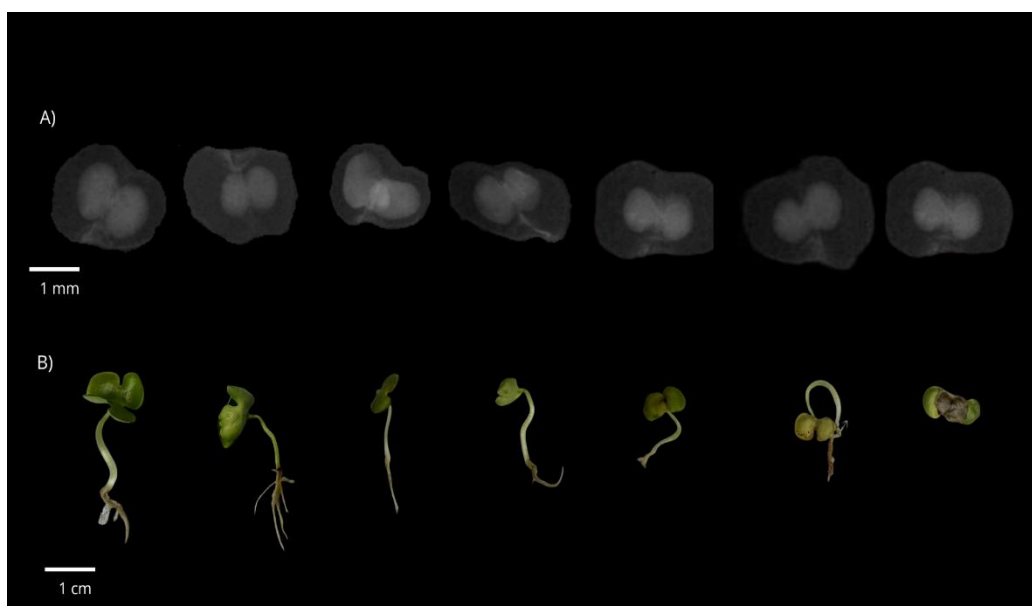


Fig 2. Sementes de Classe 2 de *Handroanthus impetiginosus*: (A) imagens radiográficas mostrando cavidade embrionária plenamente preenchida; (B) plântulas normais correspondentes oriundas dessas sementes (escala: 1 cm).



Fig 3. Sementes de Classe 1 de *Handroanthus impetiginosus*: (A) imagens radiográficas com preenchimento parcial da cavidade embrionária; (B) plântulas anormais correspondentes, com deformações morfológicas diversas.

As sementes da Classe 3, com cavidade embrionária completamente vazia, apresentaram aspecto radiográfico de tonalidade escura e uniforme, sem contraste interno identificável, e corresponderam às sementes inviáveis que não originaram plântulas. A

Figura 4 ilustra o aspecto radiográfico e externo típico dessas sementes.

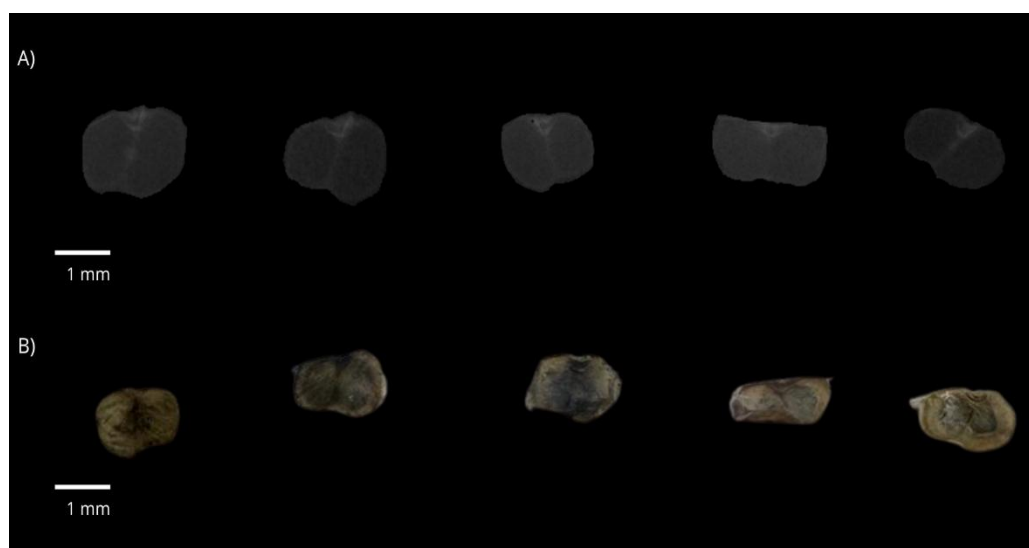


Fig 4. Sementes de Classe 3 de *Handroanthus impetiginosus*: (A) imagens radiográficas evidenciando cavidade embrionária completamente vazia, com tonalidade escura e ausência de estruturas internas visíveis; (B) aspecto externo das sementes correspondentes.

A distribuição das 200 sementes, divididas em dez repetições com 20 sementes em cada placa de acetato, sendo avaliadas nas três classes radiográficas é apresentada na Tabela 2. De modo geral, a Classe 1 foi predominante em todas as repetições, com média de 80,0% das sementes. A Classe 2 representou, em média, 14,5% das sementes, enquanto a Classe 3 correspondeu à menor proporção, com média de 5,5%.

Tabela 2. Distribuição das sementes de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) nas classes radiográficas por repetição e a emergência final, expressa em porcentagem.

Repetição	Classe 1 (%)	Classe 2 (%)	Classe 3 (%)	EF (%)
R1	85	10	5	75
R2	75	20	5	65
R3	75	20	5	60
R4	65	25	10	60
R5	100	0	0	100
R6	80	15	5	75
R7	75	10	15	75
R8	85	10	5	75
R9	80	15	5	70

R10	80	20	0	70
Média	80,0%	14,5%	5,5%	72,5%

A repetição 5 destacou-se por apresentar 100% das sementes classificadas na Classe 1, sem nenhuma semente nas Classes 2 ou 3, indicando o melhor padrão morfológico interno entre todos os lotes avaliados. Em contrapartida, a repetição 4 apresentou a menor proporção de sementes na Classe 1 (65%) e a maior proporção na Classe 2 (25%) e na Classe 3 (10%). As repetições 1 e 8 apresentaram desempenho equivalente, com 85% das sementes na Classe 1 e apenas 5% na Classe 3.

Análise visual das imagens multiespectrais

As imagens multiespectrais das sementes de ipê-roxo obtidas nas bandas do infravermelho próximo (880, 940 e 970 nm) foram selecionadas com base em dois critérios complementares: a literatura científica, que aponta essas regiões espectrais como sensíveis ao conteúdo de lipídeos, água e proteínas em tecidos de sementes (NIELSEN *et al.*, 2014; BOELT *et al.*, 2018), e uma análise estatística prévia realizada com todas as 19 bandas disponíveis no sistema VideometerLab, que confirmou que essas três bandas apresentaram as maiores correlações com as variáveis de qualidade fisiológica avaliadas. Ressalta-se que a utilização de 200 sementes distribuídas em 10 repetições de 20 unidades para o teste de raios X foi adotada como adaptação metodológica específica para esta espécie, uma vez que as Regras para Análise de Sementes (RAS) ainda não contemplam protocolo padronizado para *Handroanthus impetiginosus*, sendo a metodologia de Silva *et al.* (2024) a referência utilizada.

Através do sistema VideometerLab permitiram a diferenciação visual entre as classes de qualidade fisiológica avaliadas (Figura 5). Na escala de falsa cor adotada, valores de menor intensidade de reflectância (coloração azul-escura) indicam maior absorção da radiação incidente, associada à integridade dos tecidos e ao conteúdo de reservas da semente, enquanto valores menos negativos (coloração azul-clara a ciano) refletem maior reflectância, sugerindo comprometimento da qualidade fisiológica.

As sementes viáveis apresentaram coloração predominantemente azul-escura e uniforme nas três bandas avaliadas, com destaque para a região central correspondente ao embrião, indicando alta absorção e integridade tecidual.

As sementes inviáveis, embora semelhantes morfológicamente às viáveis na imagem em escala de cinza, exibiram coloração azul-clara a ciano nas bandas NIR, especialmente

nas regiões internas, evidenciando redução na absorção e possível deterioração dos tecidos de reserva. As sementes vazias, por sua vez, apresentaram padrão distinto já na imagem em escala de cinza, com contorno irregular e ausência de estrutura interna densa, e nas bandas multiespectrais exibiram reflectância elevada e coloração ciano de forma homogênea em toda a superfície, refletindo a ausência de embrião e endosperma.

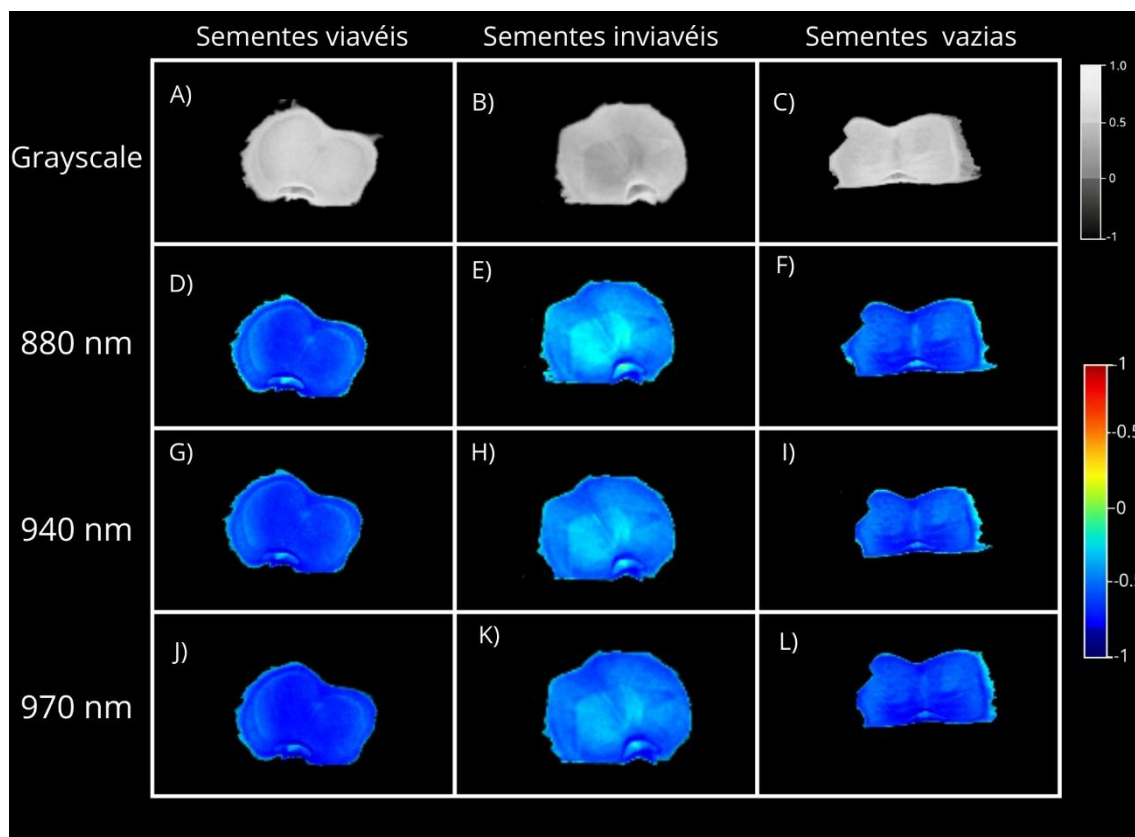


Fig 5. Imagens multiespectrais de sementes de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) classificadas segundo o grau de preenchimento da cavidade embrionária e viabilidade fisiológica. (A–C) Imagens em escala de cinza (Grayscale); (D–F) banda 880 nm; (G–I) banda 940 nm; (J–L) banda 970 nm. Coluna 1: sementes da Classe 1 — viáveis, cavidade preenchida >50% (A, D, G, J); Coluna 2: sementes da Classe 2 — inviáveis, cavidade preenchida ≤50% (B, E, H, K); Coluna 3: sementes da Classe 3 — vazias, cavidade embrionária ausente (C, F, I, L).

Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada à matriz multivariada composta por 27 variáveis, sendo elas: fisiológicas, morfológicas e espectrais avaliadas em dez repetições de sementes de ipê-roxo. A análise resultou em quatro componentes principais (CPs) capazes de explicar 100% da variância total dos dados (Tabela 3).

Tabela 3. Autovalores e variância explicada pelos quatro componentes principais extraídos pela PCA.

Componente	Autovalor	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
CP1	11,763	43,57	43,57
CP2	7,403	27,42	70,98
CP3	4,378	16,21	87,20
CP4	3,457	12,80	100,00

O primeiro componente principal (CP1) explicou 43,57% da variância total, com autovalor de 11,763, seguido pelo CP2, responsável por 27,42% da variância (autovalor = 7,403). Em conjunto, os dois primeiros componentes acumularam 70,98% da variância explicada, proporção considerada adequada para representação gráfica em biplot bidimensional (Jolliffe, 2002; Hair *et al.*, 2019). O CP3 e o CP4 contribuíram com 16,21% e 12,80%, respectivamente, completando a estrutura de variação dos dados. O *scree plot* (Figura 6) evidencia a inflexão abrupta a partir do segundo componente, corroborando a relevância dos dois primeiros eixos na síntese da variabilidade multivariada.

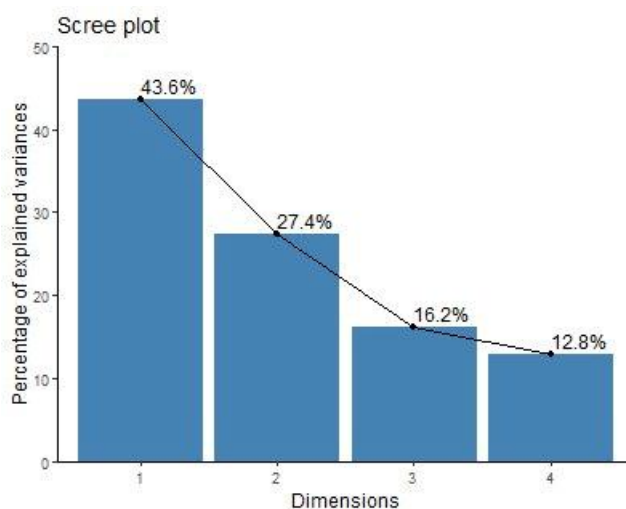


Fig 6. *Scree plot* da Análise de Componentes Principais, indicando a porcentagem de variância explicada por cada componente. CP1 = 43,6%; CP2 = 27,4%; CP3 = 16,2%; CP4 = 12,8%.

As correlações entre as variáveis originais e os dois primeiros componentes principais, bem como os respectivos valores de cosseno quadrado ($\cos^2$), que mensuram a qualidade de representação de cada variável nos eixos fatoriais, são apresentadas na Tabela

4.

Tabela 4. Correlações das variáveis com os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) e respectivos valores de $\cos^2$.

Variável	r(CP1)	r(CP2)	$\cos^2$ (CP1)	$\cos^2$ (CP2)
Emergência	-0,934	0,328	0,873	0,108
Condutividade elétrica	-0,315	-0,350	0,099	0,123
Emm (transpiração)	0,751	0,533	0,564	0,284
A (assimilação líquida CO ₂)	0,835	0,504	0,697	0,254
gsw (condutância estomática)	0,752	0,533	0,565	0,284
Ci/Ca	0,492	0,184	0,242	0,034
A/Ci (eficiência carboxilação)	0,847	0,501	0,718	0,251
Clorofila A	-0,495	-0,802	0,245	0,644
Clorofila B	-0,692	0,281	0,478	0,079
Comprimento de plântula	-0,429	0,126	0,184	0,016
Massa seca de plântula	-0,378	-0,308	0,143	0,095
Área (mm ²)	0,709	-0,041	0,502	0,002
Comprimento – Length (mm)	-0,154	-0,577	0,024	0,333
Largura – Width (mm)	0,795	-0,195	0,631	0,038
CIELab L*	0,399	0,752	0,159	0,565
CIELab A*	-0,613	0,634	0,375	0,402
CIELab B*	-0,158	0,889	0,025	0,791
880 nm	-0,372	0,927	0,139	0,860
940 nm	-0,391	0,917	0,153	0,841
970 nm	-0,389	0,912	0,151	0,831
SRE (ênfase corrida curta)	0,573	-0,073	0,329	0,005
LRE (ênfase corrida longa)	-0,877	-0,177	0,770	0,031
GLN (desunif. nível de cinza)	-0,708	0,671	0,502	0,450
RLN (desunif. comprimento corrida)	0,873	0,089	0,761	0,008

RP (porcentagem de corridas)	0,771	0,180	0,594	0,032
LGRE (ênfase cinza baixo)	-0,959	0,123	0,920	0,015
HGRE (ênfase cinza alto)	0,958	-0,166	0,918	0,028

O CP1 foi estruturado predominantemente por variáveis relacionadas à germinação e vigor das sementes e à atividade fotossintética das plântulas. As variáveis com maiores correlações negativas neste eixo foram: ênfase de corrida de nível de cinza baixo – LGRE ($r = -0,959$), emergência de plântulas ($r = -0,934$) e ênfase de corrida longa – LRE ($r = -0,877$). No sentido positivo do CP1, destacaram-se: ênfase de corrida de nível de cinza alto – HGRE ($r = 0,958$), eficiência instantânea de carboxilação – A/Ci ($r = 0,847$), taxa de assimilação líquida de CO₂ – A ($r = 0,835$), desuniformidade de comprimento de corrida – RLN ($r = 0,873$) e largura da semente – Width ($r = 0,795$). As contribuições percentuais dessas variáveis para a formação do CP1 ratificam a relevância (Tabela 4).

O CP2 foi marcado principalmente por variáveis espectrais na região do infravermelho próximo e parâmetros de cor. Os comprimentos de onda de 880 nm ($r = 0,927$), 940 nm ($r = 0,917$) e 970 nm ($r = 0,912$) apresentaram as maiores correlações positivas com este eixo, além do parâmetro de cor CIELab B* ($r = 0,889$) e CIELab A* ($r = 0,634$). No sentido negativo, a clorofila A apresentou correlação expressiva ($r = -0,802$). Esses resultados apontam que o CP2 captura a variabilidade espectral associada à composição óptica das sementes, especialmente nas regiões de reflectância NIR.

Tabela 5. Contribuição percentual das principais variáveis para a formação dos três primeiros componentes principais.

Variável	Contrib. CP1 (%)	Contrib. CP2 (%)	Contrib. CP3 (%)
Emergência	7,42	1,46	0,01
A (assimilação CO ₂)	5,93	3,43	1,06
A/Ci (eficiência carboxilação)	6,10	3,39	0,57
Emm (transpiração)	4,80	3,83	2,36
gsw (condutância estomática)	4,80	3,83	2,29
LGRE (ênfase cinza baixo)	7,82	0,20	1,48
HGRE (ênfase cinza alto)	7,81	0,37	1,20
LRE (ênfase corrida longa)	6,55	0,42	4,44

representando a qualidade de representação de cada variável nos eixos fatoriais.

O círculo de correlações das variáveis (Figura 8) ilustra graficamente as relações entre as variáveis e os eixos principais, permitindo a identificação de grupos de variáveis correlacionadas. Vetores próximos entre si indicam alta correlação positiva, enquanto vetores opostos indicam correlação negativa. Observa-se claramente a formação de dois grupos distintos: um conjunto de variáveis espectrais NIR (880, 940 e 970 nm) e de cor (CIELab B*, A*) orientado positivamente no quadrante superior do CP2, e um grupo de variáveis de desempenho fisiológico (A, A/Ci, gsw, Emm) posicionado no quadrante positivo do CP1.

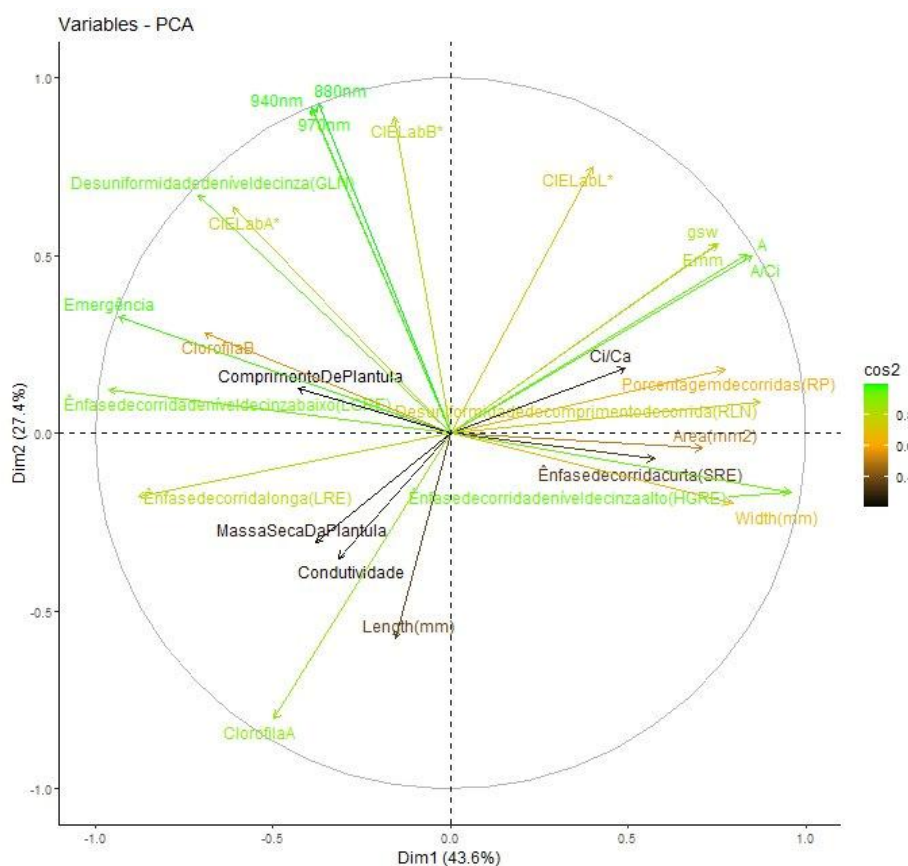


Fig 8. As coordenadas dos cinco lotes de sementes nos eixos principais e as respectivas contribuições percentuais para a formação de cada componente são apresentadas na Tabela 5.

O *biplot* da PCA (Figura 8) integra simultaneamente a dispersão das repetições e a contribuição das variáveis nos eixos principais, permitindo interpretação conjunta da estrutura multivariada dos dados. Os lotes foram distribuídos em cinco agrupamentos distintos, denominados R1 a R5, com sobreposição mínima entre si, evidenciando diferenças multivariadas expressivas entre as repetições avaliadas.

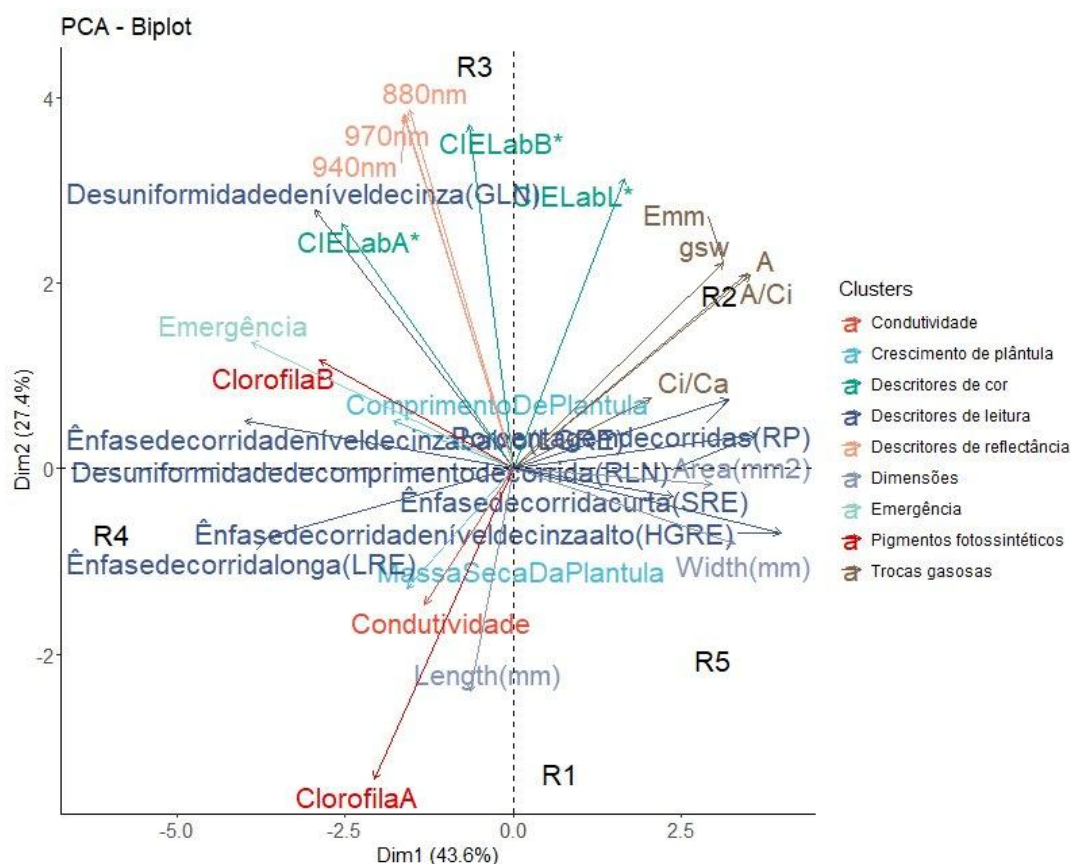


Fig 9. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos cinco lotes de sementes de ipê-roxo, mostrando simultaneamente a dispersão dos lotes (R1–R5) e os vetores das variáveis agrupados por categoria. Nota: alguns vetores de variáveis de trocas gasosas (A, A/Ci, gsw) apresentam sobreposição de rótulos no quadrante positivo do CP1; recomenda-se a aplicação da função `geom_text_repel()` na versão final para melhor identificação visual.

A repetição 4 posicionou-se no extremo negativo do CP1 (score = -6,214), com maior contribuição para este eixo (65,66%), indicando predominância de sementes com alta emergência, maior ênfase de corrida de nível de cinza baixo (LGRE) e menor atividade fotossintética relativa. Em contrapartida, as repetições 2 e 5, com scores positivos em CP1 (3,345 e 2,727, respectivamente), associaram-se a sementes com maior eficiência fotossintética (A, A/Ci), maior condutância estomática e maiores dimensões (Width). A repetição 3 destacou-se no eixo positivo do CP2 (score = 4,162, contribuição de 46,81%), sendo caracterizada por maiores reflectâncias nas bandas NIR (880, 940 e 970 nm) e maior valor de CIELab B*. Os scores individuais completos de todas as repetições nos quatro componentes principais são apresentados na Tabela [INSERIR NÚMERO DA TABELA DE SCORES — preencher após tabulação dos dados no R]. Adicionalmente, observou-se que sementes classificadas na Classe 2 pelo exame radiográfico (preenchimento $\leq 50\%$ da cavidade embrionária) tenderam a apresentar maior reflectância nas bandas NIR em relação

às sementes da Classe 1, padrão consistente com a redução do conteúdo de tecidos de reserva e a consequente menor absorção de energia nessa região espectral.

4. DISCUSSÃO

A predominância de sementes na Classe 1 (média de 80%) confirma boa integridade embrionária geral nos lotes avaliados, resultado coerente com o potencial germinativo observado nos testes fisiológicos. Padrão semelhante foi descrito por Oliveira *et al.* (2004) em *Tabebuia chrysotricha* e *T. Serratifolia*, espécies congêneres do ipê-roxo, nas quais sementes com cavidade plenamente preenchida corresponderam a mais de 75% do material avaliado e correlacionaram-se positivamente com a germinação normal. Pupim *et al.* (2008), avaliaram *Anadenanthera colubrina*, também verificaram que a classificação radiográfica por grau de preenchimento estratificou os lotes por qualidade fisiológica de forma eficiente, com sementes de maior preenchimento originando exclusivamente plântulas normais.

A associação entre sementes da Classe 2 e plântulas anormais reflete o comprometimento funcional do embrião quando o preenchimento da cavidade é parcial. Para o ipê-amarelo (*Handroanthus albus*), Medeiros *et al.* (2021) demonstraram que a proporção de sementes com cavidade parcialmente preenchida foi o principal preditor radiográfico da emergência, reforçando que a Classe 2 representa risco fisiológico mesmo em lotes de alta qualidade aparente.

A variação entre as repetições de 65% (R4) a 100% (R5) de sementes na Classe 1, é característica comum em espécies florestais tropicais com dispersão anemocórica e colheita de procedências distintas (Carvalho; Nakagawa, 2012). Em *Handroanthus serratifolius*, Silva *et al.* (2024) observaram amplitude semelhante entre as repetições (60–100% de Classe 1) e atribuíram a variação às condições climáticas durante a maturação e ao intervalo entre colheita e análise.

A repetição R7, com 15% de sementes na Classe 3, o segundo maior índice de cavidades vazias, pode refletir maior incidência de abortamento embrionário ou deterioração pós-colheita. A média de 5,5% na Classe 3 entre todos os lotes é inferior ao relatado por Nakagawa (1994) para espécies florestais tropicais em geral (8–15%), indicando que o material avaliado apresenta baixa ocorrência de sementes completamente inúteis. Em conjunto, os resultados demonstram que a radiografia é eficaz para diagnosticar a qualidade morfológica interna e segregar lotes de ipê-roxo, pois as análises de imagem são excelentes

para criarem padrões de qualidade que possam ser utilizados em conjunto com os demais testes, e em condições específicas até de forma única, especialmente em espécies com tegumento opaco que dificulta a inspeção visual direta (Oliveira *et al.*, 2004; Machado; Cícero, 2003).

As imagens multiespectrais obtidas nos comprimentos de onda de 880, 940 e 970 nm (região do infravermelho próximo – NIR) revelaram padrões distintos de reflectância entre sementes viáveis, inviáveis e vazias de *Handroanthus impetiginosus*. As sementes viáveis (Fig 6. D, G e J) apresentaram coloração predominantemente azul na escala nCDA, indicando menor reflectância no NIR, enquanto as sementes inviáveis e vazias (Fig 5. E, H, K e F, I, L) exibiram elevada reflectância, representada por tonalidades mais claras. Esse padrão está associado ao elevado conteúdo de lipídeos presentes nos tecidos das sementes viáveis de ipê-roxo, os quais absorvem a energia emitida pelos sensores NIR, reduzindo a reflectância detectada. A espécie *Handroanthus impetiginosus* é reconhecida por apresentar sementes com reservas lipídicas expressivas em seus cotilédones, justificando a forte resposta espectral nas bandas de 880, 940 e 970 nm — regiões associadas a bandas de absorção de ligações C-H características de ácidos graxos. Conforme demonstrado por Bianchini *et al.* (2021) com sementes de *Jatropha curcas*, oleaginosa utilizada como espécie modelo para o desenvolvimento da metodologia multiespectral, sendo essa resposta espectral associada ao maior conteúdo de gordura bruta nos tecidos, ao passo que sementes com tecidos deteriorados ou sem embrião são absorvedoras menos eficientes dessa energia, refletindo mais intensamente.

As imagens em escala de cinza (Fig 6. A, B e C) permitem a visualização morfológica das sementes de ipê-roxo, enquanto as imagens transformadas pelo algoritmo nCDA amplificam as diferenças espectrais entre as classes de qualidade, tornando o método uma ferramenta não destrutiva, rápida e objetiva, que reduz a subjetividade inerente às análises convencionais (Silva *et al.*, 2021).

A PCA aplicada ao conjunto multivariado de dados fisiológicos, morfométricos e espectrais de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) acumulou 70,98% da variância total nos dois primeiros componentes, proporção considerada adequada para representação gráfica bidimensional (Jolliffe, 2002). Resultado semelhante foi obtido por Medeiros *et al.* (2020) ao aplicar PCA em dados de imageamento multiespectral de sementes de *Adenanthera pavonina*, com 68,3% da variância explicada pelos dois primeiros eixos, e por Guedes *et al.* (2013), que empregaram análise multivariada para discriminar lotes de *Amburana cearensis* com variáveis de germinação e vigor, explicando 72% da variância com dois componentes.

A concentração de 43,57% no CP1 evidencia um gradiente dominante associado ao vigor e à atividade fotossintética, enquanto o CP2 (27,42%) captura variação independente ligada à resposta espectral das sementes na região NIR.

O primeiro componente principal integrou de forma coerente os descritores de textura espectral LGRE ($r = -0,959$) e HGRE ($r = 0,958$) com a emergência de plântulas ($r = -0,934$) e as variáveis de trocas gasosas — A ($r = 0,835$), A/Ci ($r = 0,847$) e gsw ($r = 0,752$). A coestruturação entre descritores GLRLM e vigor germinativo é consistente com achados de Elmasry *et al.* (2019) em sementes de trigo e cevada, nos quais LGRE e HGRE distinguiram sementes deterioradas de sementes vigorosas com acurácia superior a 90% por imageamento hiperespectral, e com Polder *et al.* (2019), que identificaram esses mesmos descritores como preditores de sanidade em sementes de beterraba.

Em espécies florestais, Medeiros *et al.* (2021) verificaram associação equivalente em *Adenanthera pavonina*, confirmando que pixels de baixa intensidade em corridas longas (LGRE) refletem maior uniformidade de tecidos internos e menor incidência de danos. A associação positiva de A/Ci e A com o CP1 indica que sementes de maior qualidade espectral originaram plântulas com melhor eficiência fotossintética.

O CP2 foi estruturado pelos comprimentos de onda NIR — 880 nm ($r = 0,927$, $\cos^2 = 0,860$), 940 nm ($r = 0,917$) e 970 nm ($r = 0,912$) — e pelo parâmetro colorimétrico CIELab B* ($r = 0,889$). Essas bandas são reconhecidamente sensíveis ao conteúdo de água, lipídios e proteínas em tecidos vegetais (Nielsen *et al.*, 2014). Boelt *et al.* (2018) verificaram, em sementes de gramíneas forrageiras, que as bandas NIR entre 850 e 970 nm foram as mais informativas para discriminar lotes por composição bioquímica, resultado convergente com o encontrado para o ipê-roxo.

A correlação negativa da clorofila A com o CP2 ($r = -0,802$) indica que lotes com maior refletância NIR produziram plântulas com menor concentração de clorofila, sugerindo distinções no ritmo de estabelecimento fotossintético. Esse padrão é coerente com o descrito na literatura, uma vez que maiores níveis de fluorescência de clorofila em sementes, indicativo de menor maturação, associam-se negativamente ao desempenho das plântulas (Boelt *et al.*, 2018). A Repetição 3, com maior score no CP2 (4,162) e contribuição de 46,81% para este eixo, apresentou perfil espectral NIR distinto, possivelmente refletindo diferenças em composição interna ou grau de maturação das sementes.

O *biplot* separou os cinco lotes com sobreposição mínima, evidenciando diferenças multivariadas expressivas. A repetição 4, no extremo negativo do CP1 (score = -6,214; contribuição = 65,66%), associou-se à maior emergência e aos maiores valores de

LGRE, configurando-se como o de maior vigor germinativo relativo. Comportamento que também foi descrito por Guedes *et al.* (2013) ao aplicar PCA em lotes de *Amburana cearensis*: o lote de maior vigor posicionou-se no extremo negativo do CP1, estruturado por emergência e comprimento de raiz, confirmando que esse eixo tende a condensar os principais indicadores de desempenho germinativo independentemente da espécie.

O R3, segregado no CP2, distinguiu-se pelo perfil espectral NIR, enquanto R1 posicionou-se próximo à origem, com variância predominantemente no CP4 (contribuição de 34,26%), indicando características intermediárias. A clara separação multivariada reforça a superioridade da abordagem integrada sobre análises univariadas, conforme demonstrado por Nakagawa (1999) e Filho (2015) para diversas espécies cultivadas e florestais.

A alta qualidade de representação ($\cos^2$) das variáveis espectrais — especialmente LGRE, HGRE e bandas NIR — nos dois primeiros componentes demonstra que o imageamento multiespectral captura informação fisiologicamente relevante de forma não destrutiva e rápida. Esse potencial já foi demonstrado em outras espécies: Elmasry *et al.* (2019) classificaram sementes de cereais por vigor com acurácia superior a 92% usando descritores espectrais e texturais equivalentes; Polder *et al.* (2019) discriminaram lotes de beterraba por sanidade com base em LGRE e HGRE obtidos por imageamento multiespectral; e Medeiros *et al.* (2021) desenvolveram modelo preditivo de vigor para *Adenanthera pavonina* combinando variáveis espectrais com PCA e aprendizado de máquina, atingindo 87% de acerto na classificação de lotes.

Para o ipê-roxo, espécie com produção sazonal, alta variabilidade entre lotes e importância crescente em programas de restauração do Cerrado (Carvalho & Nakagawa, 2012), a integração do imageamento multiespectral com PCA representa uma alternativa objetiva, rápida e não destrutiva aos protocolos convencionais, com potencial para subsidiar modelos preditivos de vigor em espécies florestais nativas. Quanto à sensibilidade comparativa das técnicas, a radiografia por raios X mostrou-se especialmente eficaz para a detecção de danos estruturais severos — como cavidades embrionárias vazias (Classe 3) e preenchimento inferior a 50% (Classe 2) —, enquanto o imageamento multiespectral demonstrou maior sensibilidade para diferenciar sementes com deterioração incipiente, uma vez que variações sutis na composição bioquímica dos tecidos (lipídeos, água, proteínas) são capturadas pelas bandas NIR antes que se manifestem em alterações morfológicas visíveis na radiografia. Essa complementaridade reforça a vantagem da abordagem integrada. Em relação à viabilidade de implementação em viveiros de larga escala, reconhece-se que o custo do equipamento VideometerLab representa uma barreira inicial. No entanto, os descritores

de textura LGRE e HGRE, dado seus elevados valores de $\cos^2$ (0,920 e 0,918, respectivamente), podem ser utilizados como indicadores rápidos de triagem em análises de rotina, e o custo pode ser diluído com o uso compartilhado em laboratórios de referência ou redes de pesquisa em sementes florestais.

5. CONCLUSÃO

A análise radiográfica por raios X mostrou-se eficaz na classificação morfológica interna das sementes de ipê-roxo, evidenciando predominância de sementes viáveis (Classe 1 = 80%) e correlação direta entre o grau de preenchimento da cavidade embrionária e o desempenho germinativo. O imageamento multiespectral nas bandas NIR (880, 940 e 970 nm) permitiu discriminar as classes de qualidade fisiológica de forma não destrutiva, com sementes viáveis apresentando menor reflectância em razão do maior conteúdo de lipídeos e integridade dos tecidos internos.

A PCA integrou eficientemente as variáveis espectrais, germinativas e fotossintéticas, explicando 70,98% da variância total nos dois primeiros componentes e confirmando a complementaridade entre as técnicas. A correlação entre as análises de imagem e os parâmetros fisiológicos ficou evidente em dois eixos principais: no CP1, os descritores de textura espectral LGRE ($r = -0,959$; $\cos^2 = 0,920$) e HGRE ($r = 0,958$; $\cos^2 = 0,918$) estruturaram-se junto à emergência de plântulas ($r = -0,934$) e às variáveis de trocas gasosas (A/C_i , $r = 0,847$; A , $r = 0,835$), demonstrando que sementes com maior uniformidade interna de tecidos, detectável pelo imageamento multiespectral, originaram plântulas com maior eficiência fotossintética. Esse padrão foi corroborado pela análise radiográfica, na qual sementes da Classe 1, com cavidade embrionária plenamente preenchida, apresentaram desempenho fisiológico claramente superior nos testes de germinação, emergência e trocas gasosas em relação às sementes das Classes 2 e 3. A convergência entre os dois métodos de imagem na predição do vigor fisiológico reforça que a integração não é apenas complementar, mas sinérgica: a radiografia delimita a integridade estrutural do embrião, enquanto o imageamento multiespectral acessa a composição bioquímica dos tecidos, e ambos predizem com maior robustez o desempenho das plântulas em campo. Os descritores LGRE e HGRE são recomendados como indicadores padrão para avaliações rápidas de vigor em espécies florestais nativas. A associação entre raios X, imageamento multiespectral e análise multivariada constitui, portanto, uma alternativa objetiva, rápida e não destrutiva aos protocolos convencionais para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes de

Handroanthus impetiginosus.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOZA DA SILVA, C. Métodos de análise de imagens não destrutivos para avaliação da qualidade de sementes. Projeto Jovem Pesquisador – **FAPESP**. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

BIANCHINI, V. J. M. et al. Multispectral and X-ray images for characterization of *Jatropha curcas* L. seed quality. **Plant Methods**, v. 17, n. 1, p. 9, 2021.

BOELT, B. et al. Multispectral imaging: a new tool in seed quality assessment. **Seed Science Research**, v. 28, n. 3, p. 222–228, 2018.

BRANCALION, P. H. S. et al. Instrumentos legais podem contribuir para a restauração de Florestas Tropicais biodiversas. **Revista Árvore**, v. 39, n. 3, p. 485-496, 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília: **MAPA**, 2025. 395 p.

CARSTENSEN, J. M.; HANSEN, M. E. VideometerLab: a multi-spectral imaging system for seed analysis. Proceedings of the european conference on precision agriculture, 2003, Berlin. **Anais Berlin**: 2003.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. 5. ed. Jaboticabal: **FUNEP**, 2012.

COSTA, A. S.; SILVA, O. S.; FERREIRA, C. D.; OLIVEIRA, C. H. S. Caracterização dendrológica de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos – Bignoniaceae. **Revista Semiárido De Visu**, Petrolina, v. 12, n. 1, p. 94-106, 2024.

DAI, J. et al. Multispectral imaging and automated analysis for quantifying grain quality to reveal known and potential novel alleles affecting grain traits in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 2026.

ELMASRY, G. et al. Non-destructive assessment of seed viability and quality using hyperspectral and multispectral imaging. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 812–829, 2019.

ELMASRY, G. et al. Recent applications of multispectral imaging in seed phenotyping and quality monitoring. **Sensors**, v. 19, n. 5, 2019.

FELIX, F. C.; MEDEIROS, J. A. D.; PACHECO, M. V. Morfologia de sementes e plântulas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 4, p. 1028-1035, 2018.

FILHO, M. J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. 2. ed. Londrina: **ABRATES**, 659 p. 2015.

GAGLIARDI, B. Relationship between germination and bell pepper seed structure assessed by the X-ray test. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 4, p. 411-416, 2011.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Processamento digital de imagens. 4. ed. New York: **Pearson**, 2018.

GUEDES, R. S. et al. Avaliação do potencial fisiológico de sementes de *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 4, p. 859-866, 2013.

JOLLIFFE, I. T. Principal component analysis. 2. ed. New York: Springer, 2002.
KARNOVSKY, M. J. A. Formaldehyde-glutaraldehyde fixative of high osmolarity for use in electron microscopy. **J. Cell Biol.** 1965.

KRAUS, J. E.; ARDUIN, M. Manual básico de métodos em morfologia vegetal. Rio de Janeiro: **EDUR**, p. 198, 1997.

KRZYŻANOWSKI, F. C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYŻANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed.). Vigor de sementes: conceitos e testes. Londrina: **ABRATES**, 1999. p. 4.1-4.26.

MACHADO, C. F.; CÍCERO, S. M. *Aroeira-branca* [*Lithraea molleoides* (Vell.) Engl.] seed quality evaluation by the X-ray test. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 2, p. 339–342, 2003.

MEDEIROS, A. D. et al. Deep learning-based approach using X-ray images for classifying *Crambe abyssinica* seed quality. **Industrial Crops and Products**, v. 164, 2021.

MEDEIROS, A. D. et al. Machine learning for seed quality classification: an advanced approach using merger data from a computer vision system. **Sensors**, v. 20, n. 1, p. 1–17, 2021.

MEDEIROS, A. D. et al. Multispectral and X-ray images for characterization of *Jatropha curcas* L. seed quality. **Plant Methods**, v. 17, 9, 2021.

MEDEIROS, A. D. et al. Multispectral imaging system to quantify chlorophyll content in soybean seeds. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 617-625, 2019.

MELO, R. A. et al. Toward robust and high-throughput detection of seed defects in X-ray images via deep learning. **Plant Methods**, v. 20, 75, 2024.

MORTENSEN, A. K. et al. The use of multispectral imaging and single seed and bulk near-infrared spectroscopy to characterize seed covering structures: methods and applications in seed testing and research. **Agriculture**, v. 11, n. 4, 301, 2021.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados na avaliação das plântulas. In: VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. (Ed.). Testes de vigor em sementes. Jaboticabal: **FUNEP**, p. 48-85, 1994.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYŻANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed.). Vigor de sementes: conceitos e testes. Londrina: **ABRATES**, p. 2-24. 1999.

- NIELSEN, G. et al. Multispectral imaging as a tool for rapid characterization of seed quality. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 22, n. 4, p. 259–268, 2014.
- O'BRIEN, T. P.; FEDER, N.; MCCULLY, M. E. Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. **Protoplasma**, v. 59, p. 368–373, 1964.
- OLIVEIRA, L. M. de et al. Avaliação da qualidade de sementes de *Tabebuia chrysotricha* (Mart. ex DC.) Standl. e *Tabebuia serratifolia* (Vahl.) Nich. pelo teste de raios X. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, n. 2, p. 138–143, 2004.
- PETTI, C. et al. Cryopreservation of Lavender Trumpet Tree (*Handroanthus impetiginosus*) Seeds. **Plants**, v. 13, n. 23, 2024.
- POLDER, G. et al. Phenotyping of plant seeds using multispectral imaging. **Plant Methods**, v. 15, n. 1, p. 1–12, 2019.
- PUPIM, T. L. et al. Adequação do teste de raios X para avaliação da qualidade de sementes de angico-branco (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 1, p. 34–38, 2008.
- RODRIGUES, E. R. et al. Ecological restoration of degraded pastures: lessons learned from a case study in Brazil. **Restoration Ecology**, v. 28, n. 5, p. 1026, 2020.
- ROSSI, I. et al. Effects of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos extract on inflammatory, immune, atherogenic profile and differentiation in THP-1 cell line. **Natural Product Research**, v. 38, n. 19, p. 3411–3416, 2024.
- SALOMÃO, A. N.; CAMILLO, J. *Handroanthus impetiginosus* – Ipê-roxo. **Plantas para o Futuro – Região Centro-Oeste**. Brasília: MMA, 2017. p. 801–813.
- SILVA, J. O. et al. Estudo da microestrutura e da condutividade elétrica de perovisquita. 2020.
- SILVA, L. J. et al. Non-destructive testing of alfalfa seed vigor based on multispectral imaging technology. **Sensors**, v. 22, 2022.
- SILVA, P. A. et al. Advances in technological innovations for forest seed quality assessment: a review. **Forests**, v. 15, n. 3, 2024.
- SILVA, T. A. et al. Avaliação da qualidade de sementes de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos por meio de ensaios de raios X. **Seed Sci.** 2024.
- ZHANG, J. et al. *Tabebuia impetiginosa*: a comprehensive review on traditional uses, phytochemistry, and immunopharmacological properties. **Molecules**, v. 25, n. 18, 2020