



DANIEL LIMA DA SILVA

**DIAGNÓSTICO DO POTENCIAL FISIOLÓGICO DE
SEMENTES DE CANOLA POR DESCRITORES E
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

LAVRAS – MG

2026

DANIEL LIMA DA SILVA

**DIAGNÓSTICO DO POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE CANOLA
POR DESCRITORES E APRENDIZADO DE MÁQUINA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora
Prof.^a DSc. Raquel Maria de Oliveira Pires

Coorientadora
Prof.^a DSc. Marcela Carlota Nery

**LAVRAS – MG
2026**

DANIEL LIMA DA SILVA

**DIAGNÓSTICO DO POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE CANOLA
POR DESCRITORES E APRENDIZADO DE MÁQUINA**

**DIAGNOSIS OF THE PHYSIOLOGICAL POTENTIAL OF CANOLA BY
DESCRIPTORS AND MACHINE LEARNING**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de fevereiro de 2026.

DSc. Raquel Maria de Oliveira Pires UFLA

DSc. Gustavo Roberto Fonseca de Oliveira UNESP

DSc. Márcio Dias Pereira UFRN

Orientadora

Prof.^a DSc. Raquel Maria de Oliveira Pires

Coorientadora

Prof.^a DSc. Marcela Carlota Nery

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Daniel Lima .

Diagnóstico do potencial fisiológico de sementes de canola por descritores e
aprendizado de máquina / Daniel Lima Silva. - 2026.
42 p. : il.

Orientadora: Raquel Maria de Oliveira Pires Pires

Coorientadora: Marcela Carlota Nery Nery

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Brassica napus L. var. oleifera Moench. 2. Energy transition. 3. Vigor. 4.
Machine learning. I. Pires, Raquel Maria de Oliveira Pires . II. Nery, Marcela Carlota
Nery . III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

Deus, meu amigo fiel e fortaleza...
À minha família, em especial aos meus pais, pelos sacrifícios que foram feitos para que eu
pudesse abraçar as oportunidades na vida.
Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo fôlego de vida concedido diariamente, pela saúde e força para que eu pudesse desenvolver esse projeto e concluir o mestrado.

Aos meus pais, Nivaldo e Andréa, à minha avó Ilza e ao meu irmão Davi, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem nos meus sonhos. Essa conquista é nossa!

À professora DSc. Raquel Maria de Oliveira Pires pela confiança, amizade e orientação ao longo desta jornada acadêmica.

À professora DSc. Marcela Carlota Nery pela coorientação, disponibilidade e incentivo durante todo o mestrado. Sou grato por acreditar em mim e nas minhas ideias.

Aos demais professores do Setor de Sementes da UFLA – DSc. Heloísa Santos, DSc. Sttela Veiga e DSc. Everson Carvalho que juntos somam forças para manter o funcionamento do maior Setor de Sementes do Brasil. Sou muito grato por ter feito parte desse meio.

As técnicas do Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS), DSc. Jaqueline Januário, DSc. Rafaela Zambaldi e DSc. Roseane pelo apoio técnico e operacional durante a condução dos experimentos, bem como a convivência diária sempre leve e cheia de risos.

Aos meus colegas de Pós-Graduação, pela convivência diária, apoio nas disciplinas e avaliações. Em especial, a Victor Maurício, Lívia Pereira e Giulyana Tavares, que sempre estiveram ao meu lado nos planos para dominação do mundo. Meus amigos, esta conquista é fruto da nossa parceria, não apenas nos experimentos, mas da cumplicidade e do apoio diário que recebi de vocês.

Aos meus coorientados, Isabella de Paula, Isabela Belló, Marina Reis e Rafael Teixeira. Espero ter contribuído para a formação de vocês. Estendo meus agradecimentos aos demais alunos que compõem o Setor.

Aos amigos que Lavras me presenteou, em especial, Luís Eduardo, Sarah Silva, Wyllian Nascimento, Thaissa Silveira e Abner Ryan pela convivência e parceria que fizeram os dias mais leves e alegres.

À Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Agronomia – DAG e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFLA – PPGAFIT/UFLA, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Mestrado.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP), em especial, a pesquisadora DSc. Clíssia Barboza Mastrangelo e ao pós-doutorando DSc. Thiago Barbosa que viabilizaram o uso dos equipamentos, além do auxílio no processamento dos dados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES),
pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a realização do Mestrado.

A todos que contribuíram, de alguma forma, com o desenvolvimento deste trabalho e
para o avanço dos planos para dominação do mundo.

Muito obrigado!

*“Os que semeiam com lágrimas colherão com gritos de alegria. Choram enquanto lançam
as sementes, mas cantam quando voltam com a colheita.”*
(Salmos 126:5-6)

RESUMO

A qualidade fisiológica das sementes é essencial para o estabelecimento inicial das culturas, especialmente em espécies em expansão, como a canola (*Brassica napus* L.). A espécie é estratégica para a transição energética global, como matéria prima para produção de biocombustíveis, além do uso industrial e alimentício. Os testes tradicionais para avaliar a qualidade das sementes, embora consolidados, apresentam limitações relacionadas ao caráter destrutivo, subjetividade e ao tempo necessário para obtenção dos resultados. Nesse contexto, a análise de imagens multiespectrais mostra-se como uma alternativa, por viabilizar avaliações rápidas e não destrutivas. Diante desse contexto, o objetivo do trabalho foi investigar a eficiência da análise de imagens multiespectrais, associada à algoritmos de aprendizado de máquina, na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de canola. Foram analisados seis lotes de sementes de duas cultivares (Nuola e Diamond), caracterizados por testes fisiológicos tradicionais. A captura das imagens multiespectrais foi obtida através do equipamento VideometerLab 4, em 19 comprimentos de onda de reflectância e autofluorescência. Os principais descritores espectrais selecionados por meio do índice de decréscimo de Gini. Modelos de classificação supervisionada foram ajustados utilizando Floresta Aleatória, Redes Neurais e PLS-DA. Os resultados demonstraram que descritores espectrais, em especial, a reflectância em 780 nm e a autofluorescência na combinação 470/500 nm, foram eficientes na discriminação dos níveis de vigor, apresentando correlação inversamente proporcional com os testes fisiológicos. Portanto, análise de imagens multiespectrais associada a algoritmos de aprendizado de máquina mostrou-se eficiente para o diagnóstico do potencial fisiológico de sementes de canola, com elevado potencial de aplicação em sistemas automatizados de controle de qualidade.

Palavras-chave: *Brassica napus* L. var. *oleífera* Moench; vigor; autofluorescência; aprendizado de máquina.

ABSTRACT

The physiological quality of seeds is essential for the initial establishment of crops, especially in expanding species such as canola (*Brassica napus* L.). The species is strategic for the global energy transition, as a raw material for biofuel production, in addition to industrial and food uses. Traditional tests to evaluate seed quality, although well established, have limitations related to their destructive nature, subjectivity, and the time required to obtain results. In this context, multispectral image analysis is an alternative, as it enables rapid and non-destructive evaluations. Therefore, the objective of this study was to investigate the efficiency of multispectral image analysis, associated with machine learning algorithms, in assessing the physiological quality of canola seeds. Six batches of seeds from two cultivars (Nuola and Diamond) were analyzed, characterized by traditional physiological tests. Multispectral images were captured using VideometerLab 4 equipment at 19 wavelengths of reflectance and autofluorescence. The main spectral descriptors were selected using the Gini decrease index. Supervised classification models were adjusted using Random Forest, Neural Networks, and PLS-DA. The results showed that spectral descriptors, especially reflectance at 780 nm and autofluorescence in the 470/500 nm combination, were efficient in discriminating vigor levels, showing an inversely proportional correlation with physiological tests. Therefore, multispectral image analysis associated with machine learning algorithms proved to be efficient for diagnosing the physiological potential of canola seeds, with high potential for application in automated quality control systems.

Keywords: *Brassica napus* L. var. *oleifera* Moench; vigor; autofluorescence; machine learning.

INDICADORES DE IMPACTO

A qualidade fisiológica, um dos atributos da qualidade de sementes, determina o potencial de estabelecimento de um lote sob condições adversas. O uso de sementes de alta qualidade é, portanto, fundamental para garantir o adequado estande inicial de plantas, refletindo diretamente no sucesso produtivo da lavoura. Para a diagnose da qualidade fisiológica de sementes, existem diversos testes que são cientificamente consolidados e amplamente utilizados pelo setor sementeiro. Porém, muito desses testes apresentam limitações, como resultados subjetivos, dependência da interpretação do analista, variabilidade de resultados e elevada demanda de tempo e treinamento. Nesse contexto, a análise de imagens multiespectrais, associada à fluorescência de clorofila, destaca-se como uma ferramenta inovadora para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes de forma não destrutiva, rápida e padronizada. Nesta pesquisa, aplicou-se essas técnicas visando a avaliação da qualidade fisiológica de sementes de canola (*Brassica napus* L.), espécie estratégica na transição energética mundial, demonstrando potencial para discriminar lotes com diferentes níveis de vigor. Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade técnica da aplicação da análise de imagens multiespectrais em sistemas automatizados de avaliação da qualidade de sementes, garantindo avanços em otimização de processos de classificação e aumento da eficiência do controle de qualidade, beneficiando diretamente a indústria sementeira e a cadeia produtiva da canola. Quantos aos impactos do trabalho, este se enquadra na área temática de Tecnologia e Produção de Sementes (7), conforme a Política Nacional de Extensão. No tocante aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, o presente projeto contribui para: ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável; ODS 7 - Energia Acessível e Limpa; ODS - 9 Indústria, Inovação e Infraestrutura; e ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima.

IMPACT INDICATORS

Physiological quality, one of the attributes of seed quality, determines the potential for establishing a crop under adverse conditions. The use of high-quality seeds is therefore essential to ensure adequate initial plant establishment, which directly affects crop production success. There are several scientifically validated tests that are widely used by the seed industry to diagnose the physiological quality of seeds. However, many of these tests have limitations, such as subjectivity, dependence on the analyst's interpretation, variability of results, and high demands on time and expertise. In this context, multispectral image analysis, combined with chlorophyll fluorescence, has emerged as an innovative tool for assessing seed physiological quality in a non-destructive, rapid, and standardized manner. In this research, these techniques were applied to evaluate the physiological quality of canola seeds (*Brassica napus* L.), a strategic crop in the global energy transition, demonstrating the potential to discriminate between batches with different levels of vigor. The results obtained demonstrate the technical feasibility of applying multispectral image analysis in automated seed quality assessment systems, ensuring advances in the optimization of classification processes and increased efficiency in quality control, directly benefiting the seed industry and the canola production chain. As for the impacts of the work, it falls within the thematic area of Seed Technology and Production (7), according to the National Extension Policy. With regard to the UN Sustainable Development Goals (SDGs), this project contributes to: SDG 2 - Zero Hunger and Sustainable Agriculture; SDG 7 - Affordable and Clean Energy; SDG 9 - Industry, Innovation, and Infrastructure; and SDG 13 - Action Against Global Climate Change.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	13
1	INTRODUÇÃO.....	13
	SEGUNDA PARTE.....	16
	ARTIGO 1 – DESCRITORES ESPECTRAIS COMBINADOS COM ALGORITMOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA NO DIAGNÓSTICO DO POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE CANOLA	17
	TERCEIRA PARTE	38
2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
	REFERÊNCIAS	38

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L.) é uma espécie oleaginosa pertencente à família botânica Brassicaceae. A espécie é resultado do melhoramento genético realizado por melhoristas canadenses, a partir da hibridação de duas espécies de colza, *Brassica oleraceae* e *Brassica rapa* (Canola Council of Canada, 2021). Seu óleo possui diversos fins, desde alimentação animal até o uso como matéria prima para produção de biodiesel, destacando a espécie no cenário global de transição energética (Gularte *et al.*, 2020; De Mori *et al.*, 2014).

No contexto de uma cultura em expansão, as sementes se tornam um fator importante para o sucesso da cultura sendo o principal veículo de propagação de tecnologia. O conceito botânico de sementes pode ser definido por unidades dispersoras especializadas (Taiz *et al.*, 2017). Agronomicamente, são um insumo de alta importância, responsáveis pelo início de uma lavoura (Krzyzanowski; França-Neto; Henning, 2018).

O conceito de qualidade de sementes tem sido construído ao longo dos anos, junto com a evolução dos testes e tecnologias que promovem resultados cada vez mais precisos e padronizados (Krzyzanowski; França-Neto; Henning, 2018). Estes resultados servem como suporte para as tomadas de decisões, desde o local do estabelecimento do campo, população de sementes, momento de colheita, beneficiamento e condições de armazenamento (Scheeren *et al.*, 2010; Bewley *et al.*, 2013).

Para desempenharem este papel de relevância, um conjunto de características são consideradas, como o potencial genético, sanidade, capacidade germinativa, vigor, pureza e integridade física que, quando associados, resultam na qualidade das sementes (Krzyzanowski; França-Neto; Henning, 2018). Por isso, o sucesso do estabelecimento de um campo é resultado da qualidade das sementes, em especial, pelas suas características fisiológicas, que determinarão a germinação e o vigor (Bewley *et al.*, 2013; Marcos-Filho, 2015).

A qualidade fisiológica das sementes é um atributo essencial na cadeia agrícola, principalmente para espécies em expansão e consolidação. Entende-se por qualidade fisiológica, um conjunto de características relacionadas à capacidade de as sementes germinarem de forma uniforme, formarem plântulas normais e vigorosas em condições adversas (Marcos-Filho, 2015).

A germinação é um teste chave no setor sementeiro para avaliação da qualidade fisiológica. O teste de germinação caracteriza o potencial máximo de germinação do material

estudado, em condições ideais (Brasil, 2025). Entretanto, as condições simuladas não refletem as condições adversas que as sementes são submetidas no campo, o que leva a interpretação de superestimação dos resultados obtidos. Além disso, há limitações relacionadas ao tempo para obtenção dos resultados e presença de patógenos (França-Neto; Krzyzanowski, 2018).

Por sua vez, o conjunto de características que promovem a germinação e o estabelecimento de uma plântula normal, em condições adversas, é denominado vigor. Logo, infere-se que, um elevado vigor indica uma resistência superior às condições do ambiente, como variações de temperatura, restrição hídrica, culminando em um crescimento rápido e uniforme das plântulas no campo (Marcos-Filho, 2015; França-Neto; Krzyzanowski, 2018).

As metodologias para avaliação do vigor são diversas. A Associação Internacional de Análise de Sementes (International Seed Testing Association - ISTA) recomenda testes de envelhecimento acelerado, tetrazólio, condutividade elétrica, deterioração controlada e protrusão da raiz primária (ISTA, 2025). Entretanto, cada teste apresenta uma metodologia específica, que deve ser aprimorada para garantir resultados confiáveis e adequados à espécie em estudo (França-Neto; Krzyzanowski, 2018).

Os tradicionais testes de germinação e vigor possuem limitações quando a padronização e exigência de analistas, que embora treinados, estão sujeitos a subjetividade das análises individuais (Boelt *et al.*, 2018), além de serem destrutivos e demandarem tempo e estrutura específica para execução. Em contraste a estes testes tradicionais, as evoluções da análise de imagem têm permitido a incorporação de novas tecnologias para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes, pelo fato de serem não destrutivas, objetivas e de alta precisão (Boelt *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2024),

Nas últimas décadas, diversas técnicas de análise de imagens têm sido desenvolvidas visando, em especial, técnicas não destrutivas, como espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), imagem multiespectral (MSI) e imagem de raios X (Baek *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2019).

Neste contexto de constante evolução, a utilização de imagens multiespectrais destaca-se por possibilitar a detecção de padrões espectrais associados à composição química e à integridade das sementes (Qiu *et al.*, 2018), integrando princípios de espectroscopia com análise computacional avançada (Mastrangelo *et al.*, 2019). Esta técnica baseia-se na captura de imagens de diferentes faixas dentro do espectro eletromagnético, correlacionando diferentes comprimentos de onda com o vigor dos lotes de sementes (Xia *et al.*, 2019).

Essa abordagem permite a identificação de danos mecânicos, níveis de deterioração, vigor, além de fornecer subsídios para a classificação automatizada de lotes quanto ao vigor em

arroz (Qiu *et al.*, 2018a), amendoim (Oliveira *et al.*, 2024), pimenta (Nobre *et al.* 2024) e até mesmo, avaliação da qualidade sanitária (Sudki *et al.*, 2024).

Diversas pesquisas têm estabelecido protocolos e explorado os potenciais dessa tecnologia na análise de imagem em culturas como milho (Ambrose *et al.*, 2016) e soja (Kusumaningrum *et al.*, 2018; Baek *et al.*, 2019), além de espécies hortícolas como repolho e rabanete (Shetty *et al.*, 2011) e tomate (Peng *et al.*, 2018).

A quantificação de clorofila como um indicador de atividade metabólica das sementes já é bem estabelecida dentro da literatura, particularmente, pela sua diminuição nos estádios tardios de formação das sementes (Marcos-Filho, 2015).

Entretanto, o uso da fluorescência de clorofila em sementes e plântulas é uma abordagem proporcionada pela análise de imagem multiespectral, permitindo correlacionar índices de refletância com o vigor do lote de sementes (Nijënstein *et al.*, 2014).

Estudos demonstram que a detecção da fluorescência em plântulas permite inferir sobre a eficiência do processo fotossintético pois, sementes de alto vigor tendem a originar plântulas com maior intensidade de fluorescência. Esse padrão foi observado em diversas culturas, incluindo soja (Cícero; Van der schoor; Jalink, 2009), arroz (Hay *et al.*, 2015), tomate (Li *et al.*, 2016) e repolho (Yadav *et al.*, 2015). França-Silva *et al.* (2022) utilizaram a técnica de análise multiespectrais de fluorescência de clorofila em sementes de soja, buscando avaliar a relação da porcentagem de sementes esverdeadas e o potencial fisiológico de duas cultivares. Os autores constataram que a partir de 4% de sementes esverdeadas, há um aumento na fluorescência de clorofila e queda no vigor das sementes.

Demir *et al.* (2013) e Jalink *et al.* (1998) associaram que o aumento dos sinais de fluorescência de clorofila era inversamente proporcional à germinação e emergência em sementes de repolho e tomate, indicando que a técnica é promissora ferramenta na diagnose do potencial fisiológico de sementes.

Estas ferramentas de análise não destrutivas representam avanços significativos no controle de qualidade de sementes, sendo promissoras para a complementação das avaliações de germinação e vigor de sementes, especialmente para culturas em expansão, como a canola.

Portanto, o presente estudo traz informações de utilidade prática para o setor mundial de canola ao propor o uso de imagens multiespectrais como proposta tecnológica para análise mais precisa da qualidade fisiológica das sementes.

SEGUNDA PARTE

Artigo 1 - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	Descritores espectrais combinados com algoritmos de aprendizado de máquina no diagnóstico do potencial fisiológico de sementes de canola
Autores:	Daniel Lima da Silva, Raquel Maria de Oliveira Pires e Marcela Carlota Nery



**ARTIGO 1 – DESCRITORES ESPECTRAIS COMBINADOS COM ALGORITMOS
DE APRENDIZADO DE MÁQUINA NO DIAGNÓSTICO DO POTENCIAL
FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE CANOLA**

**SPECTRAL DESCRIPTORS COMBINED WITH MACHINE LEARNING
ALGORITHMS FOR DIAGNOSING THE PHYSIOLOGICAL POTENCIAL OF
CANOLA SEEDS¹**

Daniel Lima da Silva

<https://orcid.org/0009-0009-3039-3478>

Marcela Carlota Nery

<https://orcid.org/0000-0002-9301-2785>

Raquel Maria de Oliveira Pires

<https://orcid.org/0000-0003-1369-4323>

Resumo: A canola é uma cultura de importância global, devido às características do óleo de seus grãos, destinado à alimentação e à produção de biocombustíveis. O avanço das técnicas de análise de imagens ampliou o uso de métodos rápidos, objetivos e não destrutivos para a avaliação da qualidade fisiológica de sementes, com destaque para imagens multiespectrais. Dada a importância da alta qualidade de sementes na implantação de uma cultura, objetivou-se investigar a aplicação da análise de imagem multiespectral como ferramenta para o controle de qualidade de sementes de canola. Foram analisados três lotes de duas cultivares (Nuola 300 e Diamond), previamente caracterizados por testes fisiológicos tradicionais. As imagens multiespectrais foram obtidas através do equipamento VideometerLab 4, de reflectância de 19 comprimentos de onda (365 a 970 nm) e 28 combinações de excitação/emissão. Aplicou-se o decréscimo de Gini para determinar os descritores espectrais mais relevantes. Os descritores espectrais de reflectância, no comprimento de 780 nm e combinação de autofluorescência 470/500 nm, foram os mais eficientes para discriminação da qualidade. Entre os algoritmos avaliados, o PLS-DA apresentou maior eficiência de classificação, seguido do PLS-DA e RN. Portanto, os descritores espectrais associados com algoritmos de aprendizado de máquina, foram eficientes na avaliação do potencial fisiológico de sementes com acurácia superior a 80%, demonstrando o potencial da análise de imagem multiespectral como ferramenta não destrutiva para o controle de qualidade de sementes de canola.

¹ Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal.

Palavras-chave: *Brassica napus* L. var. *oleífera* Moench; transição energética, vigor, aprendizagem de máquina

Abstract: Canola is a crop of global importance due, in part, to the characteristics of the oil from its seeds, which is used for food and biofuel production. Advances in image analysis techniques have led to increased use of rapid, objective, and non-destructive methods for assessing the physiological quality of seeds, with an emphasis on multispectral imaging. Due to the importance of high-quality seeds in crop establishment, the objective was to investigate the application of multispectral image analysis as a tool for quality control of canola seeds. Three lots of two cultivars (Nuola 300 and Diamond) were analyzed, previously characterized by traditional physiological tests. Multispectral images were obtained using VideometerLab 4 equipment, with reflectance of 19 wavelengths (365 to 970 nm) and 12 excitation/emission combinations. The Gini decrease was applied to determine the most relevant spectral descriptors. The spectral reflectance descriptors at a wavelength of 780 nm and a combination of autofluorescence 470/500 nm were the most efficient for quality discrimination. Among the algorithms evaluated, PLS-DA showed the highest classification efficiency, followed by PLS-DA and RN. Therefore, spectral descriptors associated with machine learning algorithms were efficient in assessing the physiological potential of seeds with more than 80% of accuracy, demonstrating the potential of multispectral image analysis as a non-destructive tool for quality control of canola seeds.

Keywords: *Brassica napus* L. var. *oleífera* Moench; energy transition, vigor, machine learning

1 INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L. var. *oleífera* Moench) é uma cultura de relevância global, ocupando a terceira posição entre as espécies oleaginosas mais produzidas no mundo (USDA, 2023). O óleo obtido dos grãos é fonte de matéria prima para produção de biocombustíveis e uso em diversas aplicações industriais, devido ao baixo teor de ácido erúico e glucosinolatos (Bocianowski & Liersch, 2022; Visentainer *et al.*, 2015). Na alimentação humana, destaca-se pela alta qualidade nutricional do óleo, rico em ácidos graxos insaturados, especialmente ácido oleico, além de apresentar propriedades funcionais associadas à redução do risco de doenças cardiovasculares (Iriarte *et al.*, 2008).

Apesar do expressivo potencial agrônomo, industrial e nutricional da canola, o sucesso de seu estabelecimento e a produtividade no campo, dependem do uso de sementes de elevada qualidade fisiológica. Sementes com alto vigor são essenciais para garantir emergência rápida e homogênea das plântulas, estando adequado de plantas e maior eficiência no aproveitamento dos recursos ambientais, fatores determinantes para o desempenho da cultura, especialmente sob condições adversas (Bewley *et al.*, 2013; Marcos-Filho, 2015).

Nas últimas décadas, os avanços na análise de imagens possibilitaram a incorporação de novas tecnologias para a avaliação da qualidade fisiológica de forma mais precisa, rápida e não destrutiva (Kumar *et al.*, 2024; Boelt *et al.*, 2018). Em contraste aos testes tradicionais que embora consolidados, apresentam limitações relacionadas ao caráter destrutivo, ao maior tempo de execução e à subjetividade associada à interpretação dos resultados (Boelt *et al.*, 2018; Baek *et al.*, 2019).

Dentre essas tecnologias, o uso de imagens multiespectrais possibilita a detecção de padrões espectrais associados à composição química e à integridade das sementes (Guangjun *et al.*, 2018), integrando princípios de espectroscopia com análise computacional avançada (Mastrangelo *et al.*, 2019). Esta técnica baseia-se na captura de imagens de diferentes faixas dentro do espectro eletromagnético, correlacionando diferentes comprimentos de onda com o vigor dos lotes de sementes (Xia *et al.*, 2019).

Essa abordagem permite a identificação de danos mecânicos, níveis de deterioração, vigor, além de fornecer subsídios para a classificação automatizada de lotes quanto ao vigor, como reportado para sementes de arroz (Qui *et al.*, 2018a), amendoim (Oliveira *et al.*, 2024), pimenta (Nobre *et al.* 2024) e até mesmo, avaliação da qualidade sanitária (Sudki *et al.*, 2024).

Diversas pesquisas têm estabelecido protocolos e explorado os potenciais do uso de imagens multiespectrais em sementes de milho (Ambrose *et al.*, 2016) e soja (Kusumaningrum *et al.*, 2018; Baek *et al.*, 2019), além de espécies hortícolas como repolho e rabanete (Shetty *et al.*, 2011) e tomate (Peng *et al.*, 2018).

Associado ao uso de imagens multiespectrais, o uso da inteligência artificial e aprendizado de máquinas tem se mostrado uma ferramenta eficaz para a interpretação dos resultados espectrais (Fonseca de Oliveira *et al.*, 2022). Essas abordagens possibilitam a diagnose da maturidade e qualidade fisiológica de sementes (Silva *et al.*, 2021; Batista *et al.*, 2022), que através de algoritmos de aprendizado de máquinas, como Floresta Aleatória, Rede Neural e PLS-DA, permitem a interpretação acurada dos resultados espectrais (Silva *et al.*, 2021), além de fornecer informações para automação do processo

Apesar dos avanços em pesquisas quanto ao uso de imagens, são limitados os trabalhos com técnicas avançadas de avaliação de qualidade fisiológica em sementes de canola. Nesse sentido, o presente estudo buscou investigar a eficiência da análise de imagens multiespectrais associados a algoritmos de aprendizado na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de canola.

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes, do Departamento de Agricultura (DAG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais e no Laboratório de Radiobiologia e Ambiente (LRA) do Centro Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, São Paulo.

Foram utilizados três lotes da cultivar Nuola 300: Lote 1 (Diamantina – MG, 2021), Lote 2 (Lavras – MG, 2021), Lote 3 (Lavras – MG, 2019); e da cultivar Diamond: Lote 4 (Brasília – DF, 2019), Lote 5 (Cascavel – PR, 2018), Lote 6 (Diamantina – MG, 2021). As sementes foram armazenadas em sacos de papel Kraft, à 10 °C e 40% de umidade relativa do ar (UR) até a realização do experimento.

Inicialmente foi feita a caracterização da qualidade desse material através dos seguintes testes:

Para o teste de umidade (U%) as amostras de sementes dos lotes foram dispostas em latas de alumínio esterilizadas e pesadas em balança analítica para a determinação do seu peso úmido. Posteriormente, foram levadas em estufa à 105 °C por 24 horas. Após esse período, as latas foram pesadas novamente e feito o cálculo para a determinação de acordo com as prescrições das Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 2025). Os resultados foram expressos em porcentagem de água.

Para o teste de germinação (G%) procedeu-se conforme as recomendações para *Brassica napus* (Brasil, 2025) com quatro repetições de 50 sementes, montadas em caixas do tipo gerbox com papel mata borrão umedecidas com água destilada 2,5 vezes o peso seco do papel. As caixas gerbox contendo as sementes foram mantidas em BOD, reguladas a temperatura constante de 20 °C, fotoperíodo de 6h de luz e 18h de escuro (Brasil, 2025). No sétimo dia, as plântulas normais foram contabilizadas. O resultado foi expresso em porcentagens de plântulas normais (Brasil, 2025).

A Primeira Contagem de Germinação (PC%) foi realizada utilizando-se a mesma metodologia descrita anteriormente para o teste de germinação, sendo, no entanto, contabilizada a porcentagem de plântulas normais aos cinco dias após a semeadura (Brasil, 2025).

O Índice de Velocidade de Germinação (IVG) foi realizado com a contagem diária de plântulas germinadas no teste de germinação até a estabilização da contagem. Os resultados foram calculados através da fórmula proposta por Maguire (1962).

Para a massa seca das plântulas (MS) realizou-se a secagem das plântulas normais obtidas no teste de germinação, aos sete dias. As plântulas, separadas por tratamento, foram colocadas em sacos de papel kraft e em estufa de circulação de ar à 60 °C, por 72 horas. Após

esse período, o material foi retirado e pesado em balança de precisão. Os resultados foram expressos em gramas (g).

Teste de frio (TF): conforme metodologia proposta por Cicero e Vieira (2020). Foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes acondicionadas em caixas plásticas de germinação (Gerbox®) (11 x 11 x 3,5 cm) sobre duas folhas de papel Germitest, tampadas e seladas com plástico filme, depois foram colocados na câmara fria a 10 °C por sete dias. Após este período, conduziu-se um teste de germinação (Brasil, 2025). O resultado foi expresso em percentagem de plântulas normais.

Teste de envelhecimento acelerado: conforme metodologia proposta por Silva et al., 2025, 200 sementes serão dispostas em caixas do tipo gerbox com tela de alumínio, formando uma camada simples sobre a tela. No interior, serão adicionadas 40 ml de solução saturada de Cloreto de Potássio (KCL), tampadas, vedadas com papel filme, e mantidas em câmara de germinação do tipo B.O.D., durante os períodos de 24 horas a 41°C. Após, será conduzido um teste de germinação conforme descrito acima;

Os testes de caracterização fisiológica foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições de 50 sementes. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade, através dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Em seguida, aplicou-se o teste de Scot-Knott para a comparação das médias à 5% de probabilidade.

Para obtenção dos sinais de fluorescência e reflectância espectral, foi utilizado o equipamento VideometerLab 4 (Videometer A/S, Herlev, Dinamarca). Para tal, quatro réplicas de 25 sementes foram dispostas em uma folha de acetato, na mesma posição utilizando fita adesiva dupla face. As imagens multiespectrais foram geradas usando 12 combinações de excitação/emissão: 365/400, 405/500, 430/500, 450/500, 470/500, 405/600, 515/600, 540/600, 570/600, 630/700, 645/700, 660/700 nm (Barboza da Silva *et al.*, 2021), e os comprimento de refletância de 19 comprimentos de onda à 365, 405, 430, 450, 470, 490, 515, 540, 570, 590, 630, 645, 660, 690, 780, 850, 880, 940 e 970 nm. Os dados de autofluorescência, refletância, cor, forma e textura foram extraídos e processados através do software VideometerLab™.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, considerando-se os lotes como fator. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando constatado o efeito significativo, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott–Knott à 5%.

A importância dos descritores espectrais de reflectância foi determinada com base no coeficiente de Gini, obtido a partir do modelo de Floresta Aleatória (Random Forest).

Para o desenvolvimento dos modelos de machine learning os lotes foram classificados em três níveis de vigor (baixo, médio e alto), de acordo com as respostas obtidas nos modelos de classificação. A análise exploratória multivariada foi realizada por meio da Análise Discriminante Linear (LDA), com dois enfoques: (i) discriminação dos grupos de vigor e (ii) discriminação individual dos lotes. Para a modelagem preditiva, os dados foram divididos em conjuntos de treinamento (70%) e teste (30%).

Foram ajustados três algoritmos de classificação supervisionada: Floresta Aleatória, Redes Neurais Artificiais (*Multilayer Perceptron*) e PLS-DA (*Partial Least Squares Discriminant Analysis*). O treinamento dos modelos foi conduzido utilizando validação cruzada repetida (10-fold, com 5 repetições), com estimativa de probabilidades de classe e otimização baseada na acurácia. O desempenho dos modelos foi avaliado pela acurácia global e coeficiente Kappa. Para o modelo PLS-DA, foi realizada a análise da importância das variáveis (VIP – *Variable Importance in Projection*), para identificar os descritores espectrais mais relevantes para a discriminação dos níveis de vigor.

A correlação entre os descritores fisiológicos e espectrais foi testada utilizando o coeficiente de Spearman. As descrições quanto a magnitude das correlações foi proposta por Davis (1971), onde os valores de $r = 0,01$ a $0,09$ são designadas como correlações desprezíveis, $r = 0,10$ a $0,29$ são correlações consideradas baixas, $r = 0,30$ a $0,49$ são correlações moderadas, $r = 0,50$ a $0,69$ são correlações substanciais, $r = 0,70$ a $0,99$ são correlações muito altas e $r = 1,0$ é a correlação perfeita.

3 RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos no teste de primeira contagem, observa-se melhor desempenho dos lotes 1, 2 e 6 com valores acima de 90% de germinação aos cinco dias, e inferior do lote 6, com aproximadamente 35% de germinação no mesmo intervalo de tempo (Figuras 1A). Assim, com base nos resultados, os lotes agruparam-se nas seguintes categorias: germinação alta (L1 e L6), média (L2 e L5) e baixa (L3 e L4) (Figura 1B).

Quanto a velocidade de germinação, dado pelo IVG (Figura 1C), observa-se uma maior estratificação da qualidade dos lotes, uma vez que distinguiu melhor aqueles inicialmente considerados de melhor qualidade (Lotes 1, 2 e 6). Para os demais lotes, observou-se o mesmo comportamento das variáveis PC e G, destacando-se o lote 3, como de qualidade inferior.

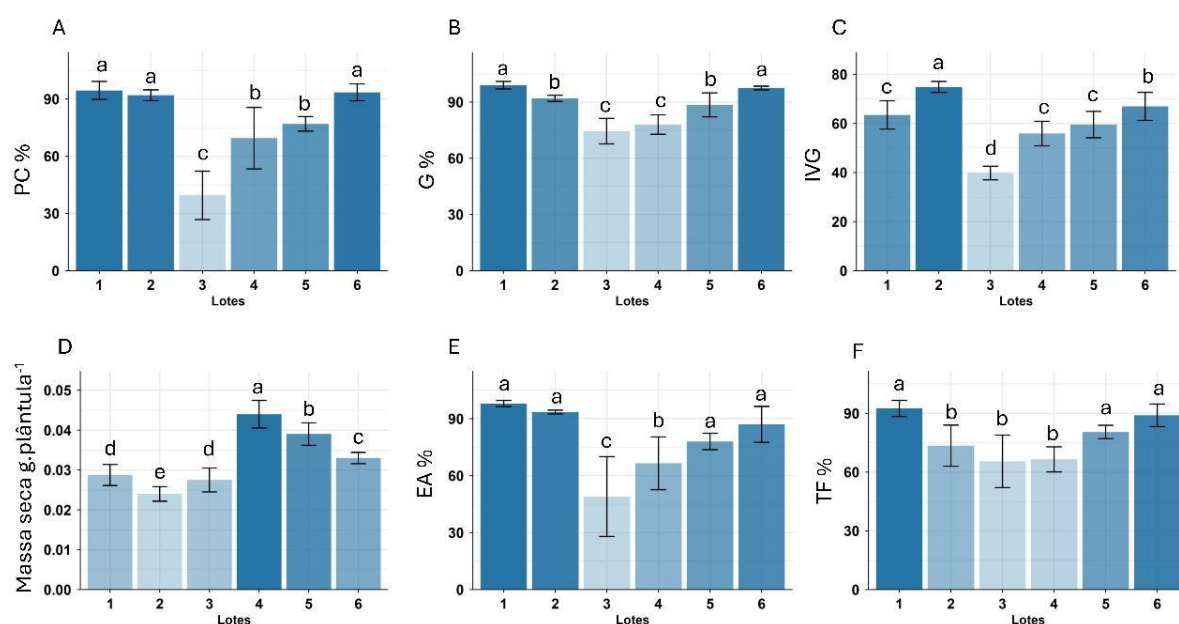


Figura 1. Primeira contagem de germinação (PC), Germinação (G), índice de velocidade de germinação (IVG), massa seca de plântulas, germinação após envelhecimento acelerado (EA) e germinação após teste de frio (TF) em sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) (n =24). Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente entre si pelo teste de Sknot Knott (P = 0,05).

Nas observações dos valores obtidos de massa seca (Figura 1D), observa-se que o lote 4 refletiu maior acúmulo de massa seca, seguido dos lotes 5 e 6, todos da cultivar Diamond, o que demonstra que essa cultivar apresenta superioridade fisiológica na conversão de assimilados em matéria estrutural.

Quanto aos resultados obtidos no teste de envelhecimento acelerado, observa-se a mesma tendência do teste de vigor primeira contagem, com a superioridade dos lotes 1, 2 e 6, acrescido do lote 5. Em sequência, o L4 com qualidade mediana e o lote 3 com menor germinação após estresse com alta umidade e alta temperatura (Figura 1E). Já o teste de frio, foi menos eficiente na separação em classe de vigor, dividindo os lotes em alto (L1, L5 e L6) e baixo vigor (L2, L3 e L4) (Figura 1F).

Apesar das variações observadas entre os testes fisiológicos, a análise conjunta dos parâmetros acima, permitiu classificar os lotes de sementes de canola em grupos distintos de qualidade. Os lotes 1 e 6 apresentaram desempenho superior e consistente na maioria dos testes avaliados, caracterizando-se como lotes de alta qualidade. Em contraste, o lote 3 apresentou desempenho inferior em praticamente todas as variáveis analisadas, sendo classificado como de baixa qualidade fisiológica. Os lotes 2, 4 e 5 exibiram comportamento intermediário, com respostas específicas dependendo do teste, evidenciando que diferentes atributos fisiológicos podem ser expressos de forma independente.

Avaliou-se também as propriedades físicas das sementes de cada lote e observou-se que, as sementes do lote 4 são aquelas que apresentaram maior área (Figura 2A) assim como maior comprimento. Essa última variável, acrescido do lote 1 (Figura 2B). Esses resultados refletem em maior acúmulo de massa seca das plântulas, como observado na Figura 1D, além de uma relação positiva entre o tamanho da semente e a disponibilidade de reservas, favorecendo o crescimento inicial das plântulas.

Importante destacar, no entanto, que o maior tamanho e massa seca não se traduziram necessariamente em superioridade nos testes de vigor, evidenciando que o desempenho sob estresse e a eficiência fisiológica são atributos independentes do tamanho da semente.

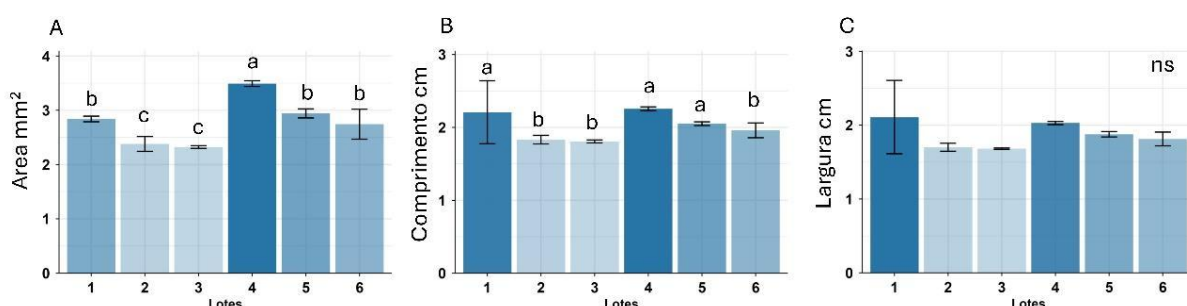


Figura 2. Propriedades físicas (área, comprimento e largura) de sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) (n =24). Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente entre si pelo teste de Sknot Knott (P = 0,05).

Para as assinaturas espectrais de reflectância, observa-se que os lotes de sementes de canola, apresentaram comportamento semelhante ao longo de todo o espectro com progressão de reflectância conforme aumento dos comprimentos de onda (Figura 3).

Na região entre 365 e 700 nm, os valores de reflectância foram relativamente baixos, com pequenas variações entre os lotes, indicando forte absorção da radiação por pigmentos, especialmente clorofila residual. Entre aproximadamente 700 e 780 nm observa-se um aumento acentuado da reflectância e na região do infravermelho próximo (780–970 nm), as diferenças entre os lotes tornam-se mais pronunciadas, refletindo variações na composição química e na estrutura física das sementes, especialmente relacionadas a compostos orgânicos como lipídios, proteínas e carboidratos, bem como à densidade dos tecidos.

Lotes que apresentaram maiores valores de reflectância nessa região (780-970 nm) indicam sementes estruturalmente mais organizadas e com maior conteúdo de reservas, o que está de acordo com os resultados morfológicos e fisiológicos observados, como maior área de semente e maior acúmulo de massa seca de plântulas.

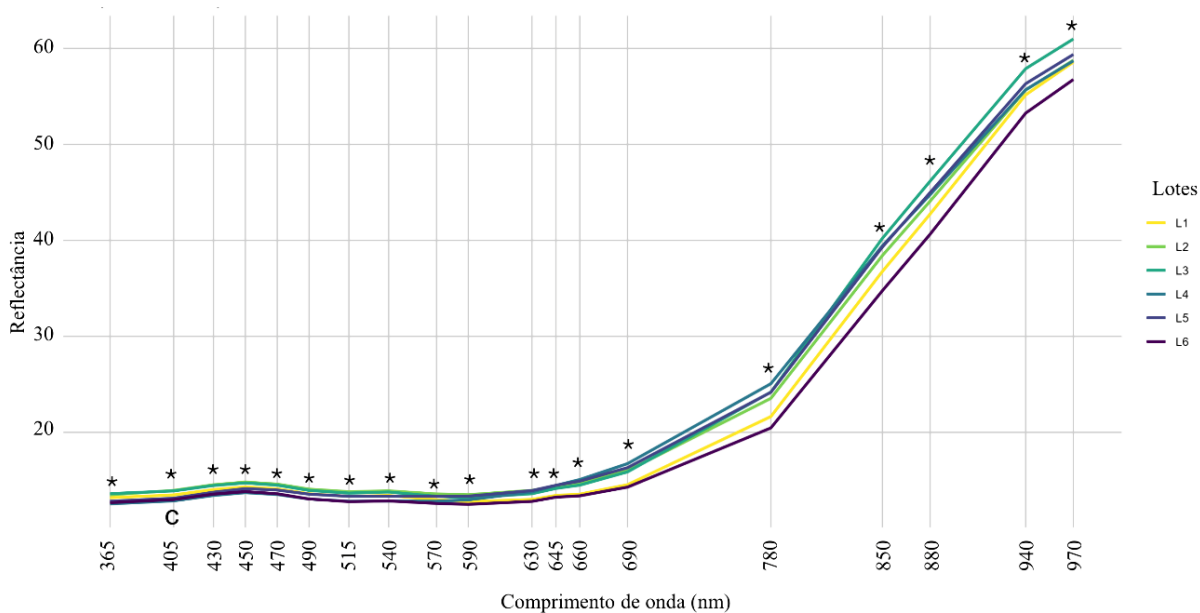


Figura 3. Curva de reflectância em diferentes comprimentos de onda em sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) (n =24). *Indica diferença significativa pelo teste de Sknot Knott (P = 0,05).

Visando elencar os comprimentos de onda mais importantes na discriminação dos lotes, aplicou-se o índice de decréscimo de Gini nas variáveis de reflectância (Figura 4A). Assim observou-se que, as sementes dos lotes provenientes do cultivar Nuola (L1, L2 e L3), exibiram menores reflectâncias à 365 nm (Figura 3B). De maneira geral, nos comprimentos de 690 nm, 780 nm e 850 nm, as sementes dos lotes 1 e 6 (alta qualidade) exibem menor reflectância (Figura 3C-E) e, por último, as sementes do lote 3, considerado de menor qualidade, apresentaram reflectância alta a 940 nm e 970 nm (Figura 3F-G).

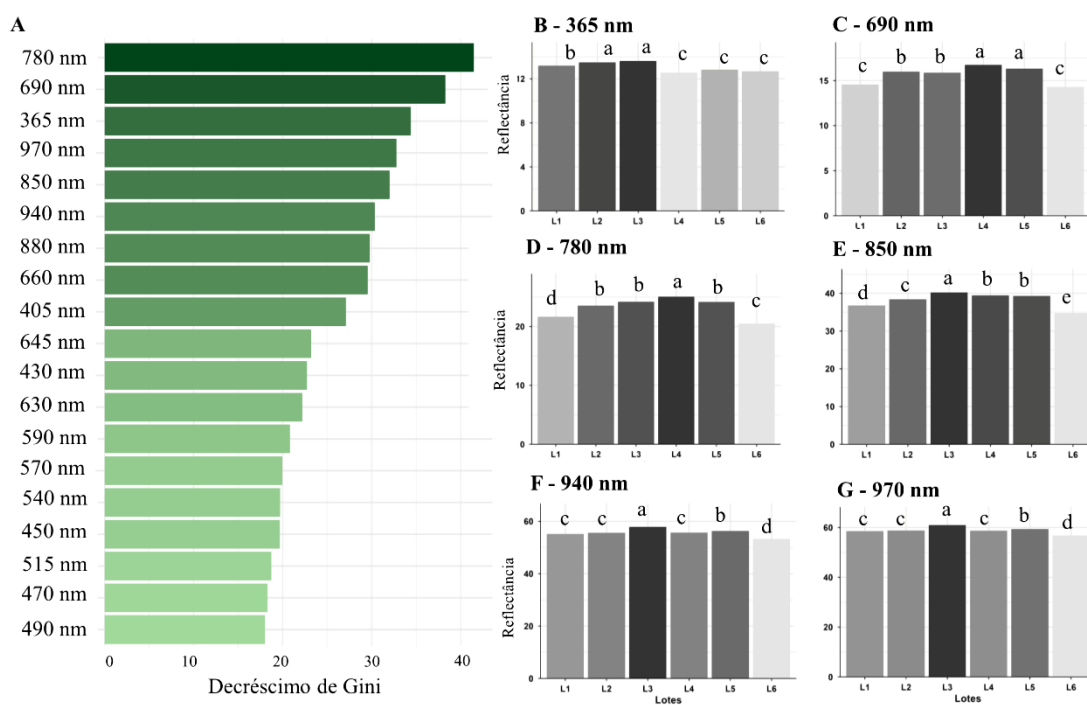


Figura 4. (A) Índice de decréscimo de Gini baseado em descritores multiespectrais de sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) ($n = 600$). Refletâncias (B) 365 nm, (C) 690 nm, (D) 780 nm, (E) 850 nm, (F) 940 nm e (G) 970 nm de sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) ($n = 24$). Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente entre si pelo teste de Sknot Knott 5%.

Na combinação de excitação/emissão (nm), observa-se elevada autofluorescência nas sementes do lote 3, enquanto as da classe de médio vigor (L2 e L5) emitiram sinais intermediários. Sementes intermediárias e de baixo vigor (L4 e L3) exibiram aumento nos sinais de fluorescência (Figura 5).

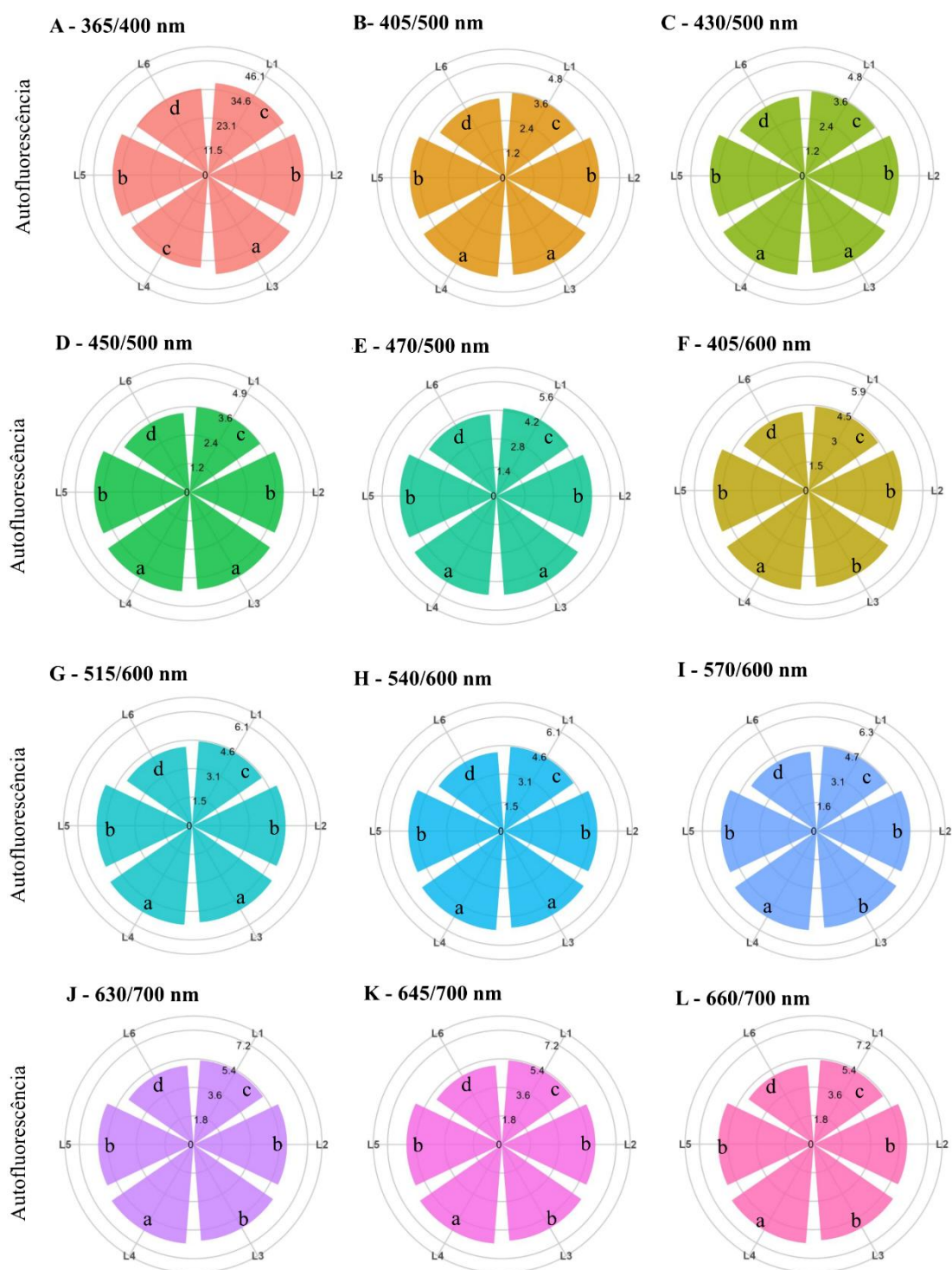


Figura 5. Sinais de autofluorescência em diferentes combinações de excitação/emissão em sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) (n = 24). Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente entre si pelo teste de Sknot Knott 5 %.

As combinações de excitação/emissão 405/600 nm, 570/600 nm, 630/700 nm, 645/700 nm e 660/700 nm apresentaram sinais de fluorescência altos nas sementes provenientes do lote 4 e em contraste com os sinais baixos nas sementes provenientes do lote 6 (Figura 5).

A Análise Discriminante Linear (LDA) permitiu, com base nos descritores espectrais (reflectância e fluorescência), a separação dos grupos tanto por lotes quanto por classes de vigor (Figura 6).

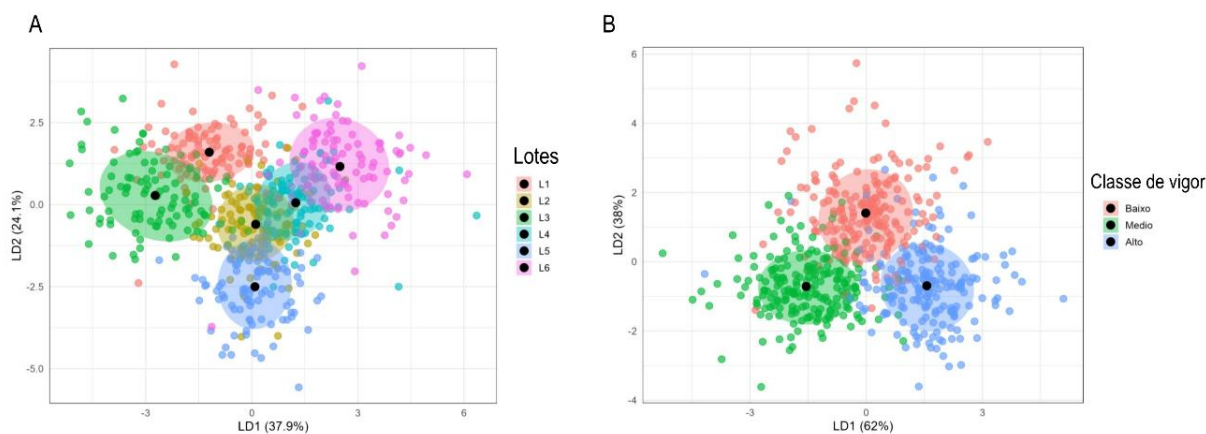


Figura 6. Análise linear discriminante a partir da reflectância e autofluorescência espectral em (A) sementes de canola de diferentes lotes e cultivar: L1, L2, L3 (Nuola), L4, L5 e L6 (Diamond) e (B) sementes de canola agrupadas em função do nível de vigor: alto (L1 e L6), médio (L2 e L5) e baixo (L3 e L4) (n = 600). Pontos escuros indicam o centroide do respectivo grupo.

Na discriminação por lotes, os dois primeiros discriminantes explicaram 62,0% da variância total (LD1 = 37,9%; LD2 = 24,1%), levando a uma separação parcial entre os grupos, com sobreposição entre lotes, em especial L2 e L4, indicando similaridade espectral e variabilidade fisiológica (Figura 6A).

Quando os dados foram organizados em classes de vigor, a capacidade discriminante foi ampliada, com os dois primeiros eixos explicando 100% da variância (LD1 = 62,0%; LD2 = 38,0%). Observou-se menor sobreposição, com forte contraste entre as classes de vigor, demonstrando que os descritores espectrais são mais sensíveis às diferenças no potencial fisiológico das sementes das classes do que à distinção entre lotes individuais (Figura 6B).

A classificação baseada no algoritmo RF atingiu ajuste perfeito no treino do modelo (acurácia e Kappa = 1,00), contudo seu desempenho no teste caiu acentuadamente (acurácia 0,70 e Kappa 0,55), indicando possível sobre ajuste do modelo (Figura 7A).

A matriz de confusão do modelo de RF revelou elevada taxa de erros, especialmente na distinção entre sementes de baixo e médio vigor (Figura 7A). Em contraparte, os algoritmos RN e PLS-DA apresentaram desempenho considerável na classificação do potencial fisiológico de sementes de canola (Figura 7B-C).

O algoritmo RN atingiu acurácia 0,83 e Kappa 0,75 no conjunto de teste, além de excelente ajuste no treinamento (acurácia 0,99; Kappa 0,98). A matriz de confusão indicou elevadas taxa de acertos nas classes, porém com erro ainda elevado entre as sementes de baixo e médio vigor (Figura 7B).

O modelo PLS-DA apresentou desempenho levemente superior em relação ao de RN, no conjunto teste (acurácia 0,84; Kappa 0,76), atingindo no treinamento acurácia 0,86 e Kappa 0,79. A distribuição dos acertos na matriz de confusão da PLS-DA evidenciou equilíbrio na classificação dos níveis de vigor, com menor incidência de erros sistemáticos entre vigor médio e baixo, reforçando a robustez do algoritmo, demonstrada no conjunto teste (Figura 7C).

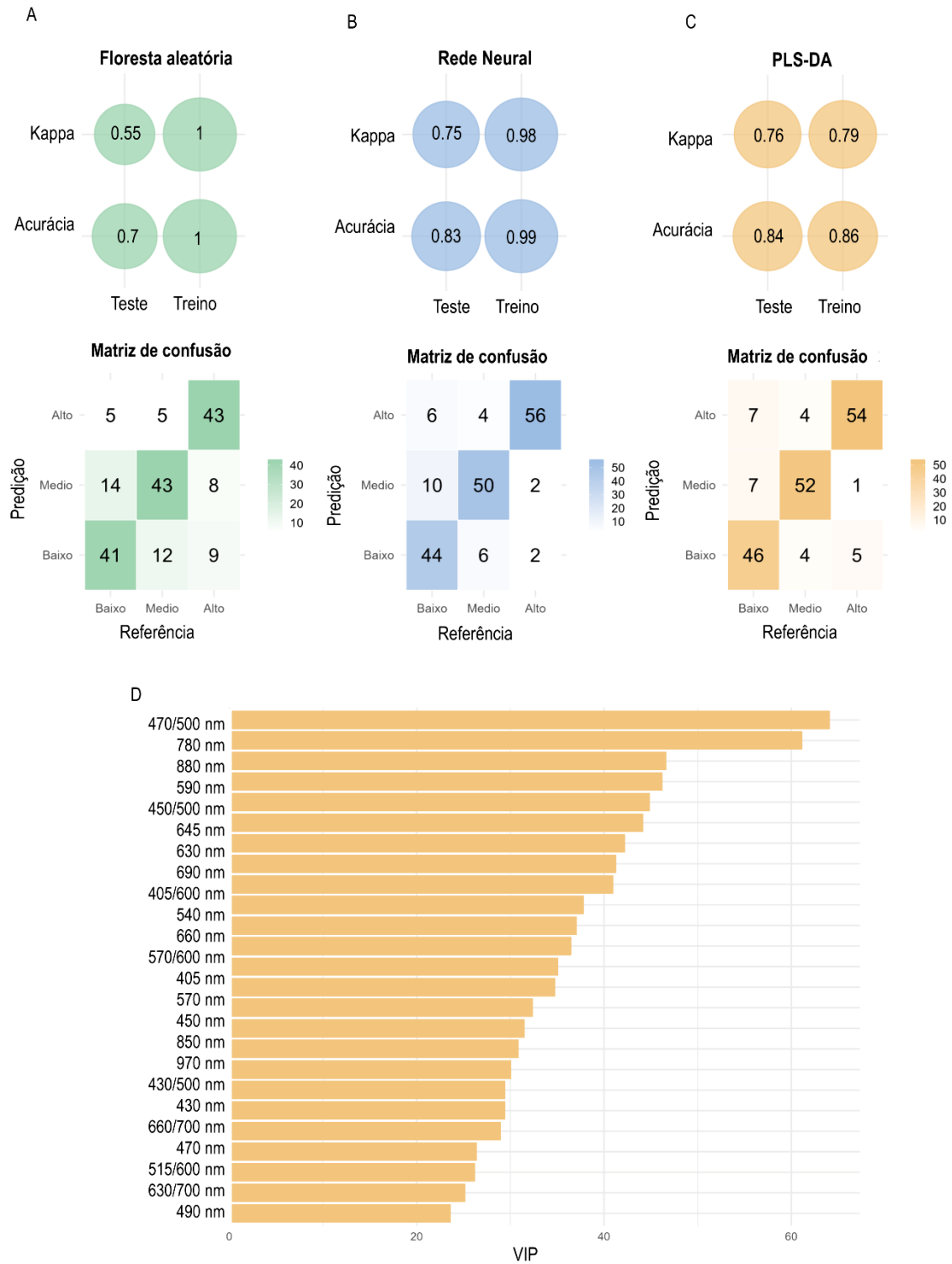


Figura 7. (A) Classificação de sementes de canola em função do nível de vigor: alto (L1 e L6; Nuola e Diamond, respectivamente), médio (L2 e L5; Nuola e Diamond, respectivamente) e baixo (L3 e L4; Nuola e Diamond, respectivamente); utilizando reflectância e autofluorescência espectral baseado em algoritmos de floresta aleatória, redes neurais e análise discriminante de mínimos quadrados parciais (PLS-DA) (n = 600). A performance dos modelos foi avaliada por meio da acurácia e coeficiente Kappa. A matriz de confusão refere se ao teste do modelo (n = 60). (B) Importância das Variáveis na Projeção (VIP) do modelo de classificação baseado em análise discriminante de mínimos quadrados parciais (PLS-DA).

A análise da importância das variáveis (VIP) a partir do modelo PLS-DA (Figura 7D) elencou as 24 variáveis mais importantes para o modelo, indicando que o descritor auto fluorescente na combinação de excitação/emissão 470/500 nm foi o mais importante para o algoritmo discriminar o potencial fisiológico das sementes de canola, seguidos pelas bandas de reflectância 780 nm, 880 nm, 590 nm e combinação de excitação/emissão 450/500 nm, complementando as cinco variáveis mais importantes para o modelo (Figura 7D).

As imagens obtidas após a transformação pelo algoritmo nCDA foram utilizadas na construção de um painel, o qual evidenciou a capacidade das imagens multiespectrais em discriminar o potencial fisiológico de sementes baseados em padrões espectrais (Figura 8). Verificou-se uma relação inversa entre vigor e autofluorescência à 470/500 nm e reflectância à 780 nm (Figura 8).

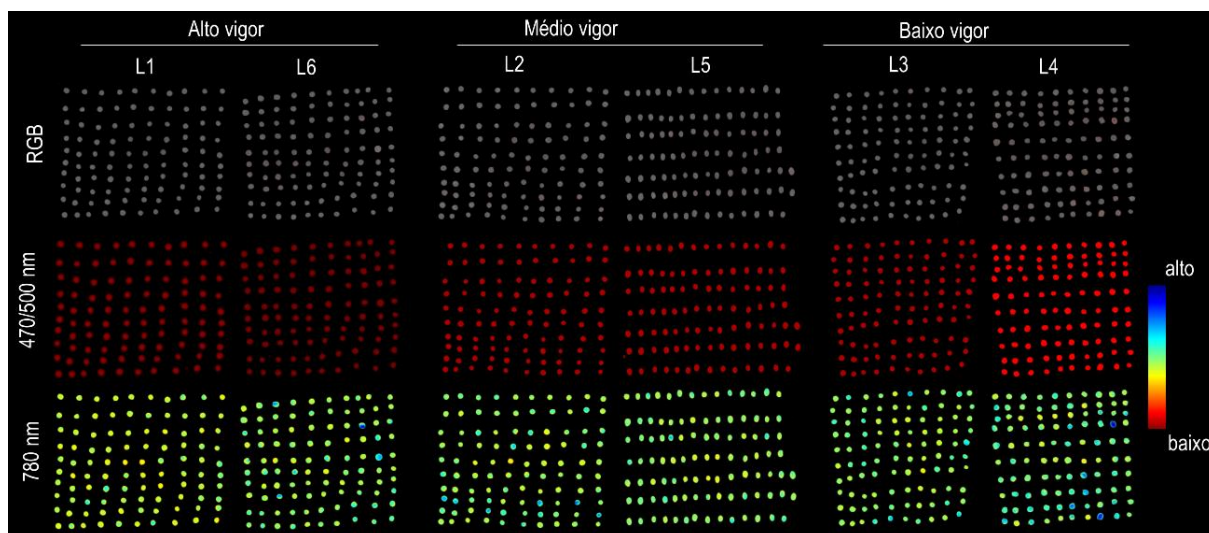


Figura 8. Sementes de canola com nível de vigor: alto (L1 e L6; Nuola e Diamond, respectivamente), médio (L2 e L5; Nuola e Diamond, respectivamente) e baixo (L3 e L4; Nuola e Diamond, respectivamente) assistida por imagens RGB (cada pixel individual é representado pelos canais vermelho, verde e azul) e imagens espectrais correspondente à 780 nm e na combinação de excitação/emissão 470/500 nm e 780 nm, após transformação da imagem pelo algoritmo nCDA.

Os maiores coeficientes de correlações foram observados entre as bandas 780 nm, 880 nm, 450/500 nm e 470/500 nm e a primeira contagem de germinação e teste de germinação, evidenciando uma relação inversamente proporcional (-0,72). De forma semelhante, os comprimentos de onda 780 nm, 880 nm, 450/500 nm apresentaram correlações substanciais e inversamente proporcionais com os testes de envelhecimento acelerado (-0,55) e teste de frio (-0,61) (Figura 9).

Outras correlações relevantes observadas entre 880 nm e o índice de velocidade de germinação (-0,51), a correlação muito alta entre massa seca de plântulas e a área das sementes

(0,75), entre germinação e envelhecimento acelerado (0,82) e teste de frio (0,83). Por último, observam-se correlações baixa entre 780 nm, 880 nm, 450/500 nm e 470/500 nm e as propriedades físicas (Figura 9).

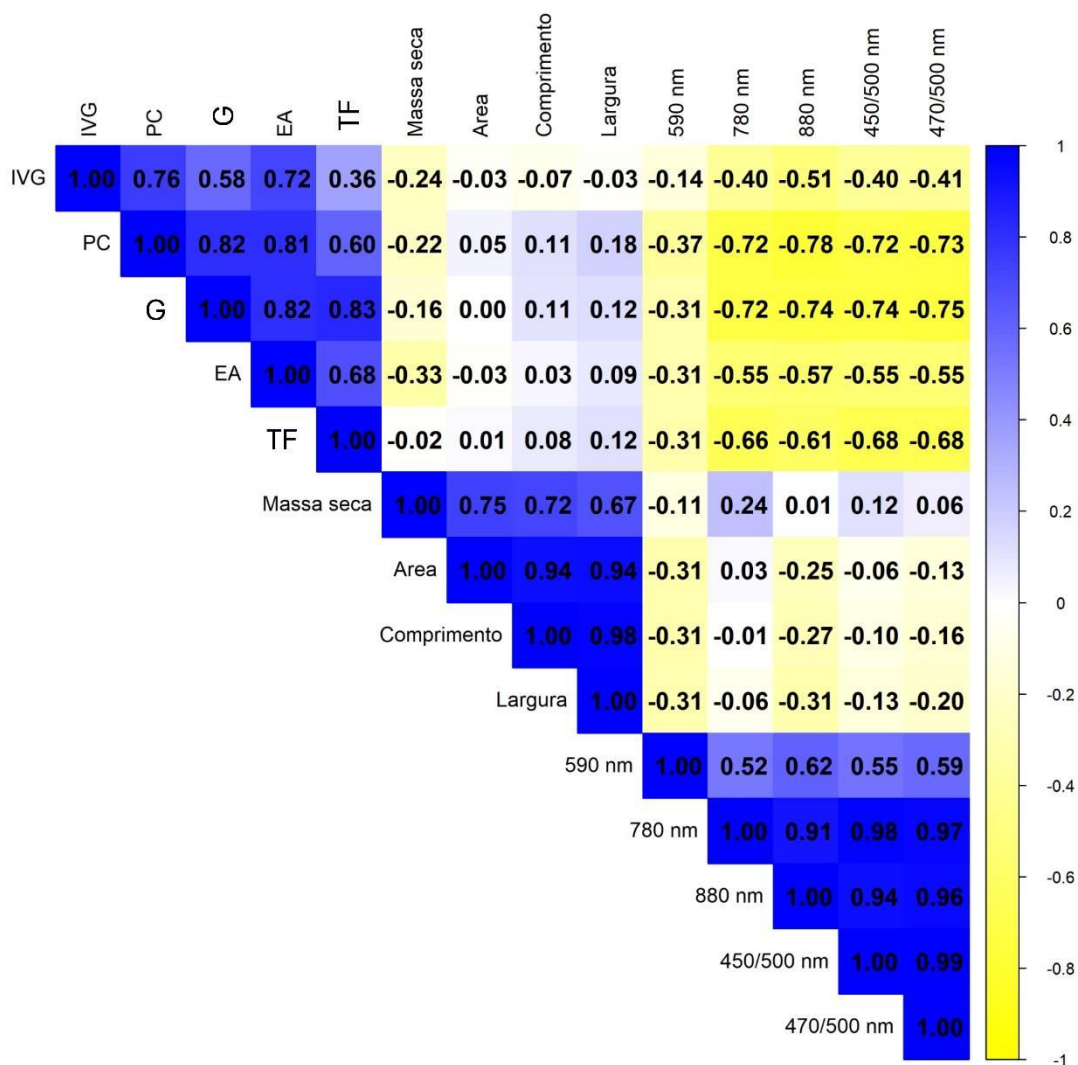


Figura 9. Coeficientes de correlação de Spearman entre características fisiológicas (índice de velocidade de germinação – IVG, primeira contagem de germinação – PG, germinação – G, envelhecimento acelerado – EA, teste de frio – TF, massa seca de plântulas, área, comprimento e largura) e descritores espectrais (590 nm, 780 nm, 880 nm, 450/500 nm e 470/500 nm).

4 DISCUSSÃO

De acordo com a instrução normativa que dita as regras para comercialização de sementes de canola, o valor mínimo de germinação deve ser de 80% (Brasil, 2013). Baseado nesse valor e nos resultados fisiológicos da Figura 1, distinguiu-se os lotes do presente estudo em 3 grupos: alta qualidade, qualidade mediana e qualidade inferior.

Avançando na abordagem baseada em descritores espectrais, os dados demonstraram uma classificação supervisionada acurada entre as classes de vigor (Figura 7B-C), em especial, utilizando a autofluorescência espectral (Figura 5; Figura 7B). Barboza da Silva *et al.* (2021) apontaram a potencialidade do uso de autofluorescência para diagnosticar o vigor de sementes de soja.

Em sementes de canola, de acordo com o Índice de Gini, observou-se a relevância dos comprimentos de onda nas combinações de 405/550 nm, 430/500 nm, 450/500 nm, 470/500 nm, 515/600 nm e 540/600 nm (Figura 5B, C, D, E, G e H). Estes descritores estão associados ao conteúdo de lignina no tegumento das sementes (Barboza da Silva *et al.*, 2021). Observou-se que os lotes de baixo vigor apresentaram maiores índices de reflectância nessas combinações, o que sugere que o maior teor de lignina pode dificultar a embebição, afetando diretamente a velocidade e a precocidade da germinação (Figuras 1A e C).

A combinação de excitação/emissão à 405/500 nm está associado a presença de compostos fenólicos e associado negativamente ao vigor em sementes de soja (Barboza da Silva *et al.*, 2021). A presença destes compostos limita o oxigênio para o embrião (Rodríguez *et al.*, 2015), altera o balanço dormência-germinação (Jovanović *et al.*, 2024), e quando apresentados em altos teores indicam deterioração de sementes (Barboza da Silva *et al.*, 2021), uma vez que estes compostos estão associados aos processos oxidativos (Noctor *et al.*, 2018).

O aumento do número de sementes deterioradas promove um decréscimo na velocidade da germinação (Delouche e Baskin, 1973) como verificado nas sementes de baixo e médio vigor do presente estudo (Figura 1A e C), as quais apresentam maiores sinais de fluorescências na combinação de excitação/emissão relacionada a presença de fenóis (Figura 5B).

Foi possível verificar que os sinais de autofluorescência que distinguiram as classes de vigor não têm relação com os picos de emissão das clorofilas, nas combinações de 405/600 nm, 630/700 nm, 645/700 nm e 660/700 nm (Barbosa *et al.*, 2022), contudo, no presente estudo os sinais nestas combinações de excitação/emissão foram muito baixos nos lotes classificados como de alto vigor (Figura 1B e F; 5F, J, K e L). Isto indica que, fluorescências baixas de clorofilas implicam em maior qualidade de sementes de canola (Figura 5B, C, D, E, G e H).

As faixas do espectro infravermelho próximo (NIR), em especial nos comprimentos de onda de 780 e 850 nm são baixos nas sementes de alto vigor (Figura 4D-E). As faixas do NIR são associadas com as absorções de grupos oxigenados (O-H, C-H e N-H) (Ozaki *et al.*, 2016; Hills, 2017; Xia *et al.*, 2019), que são importantes para a avaliação do potencial fisiológico de sementes, uma vez que está associada aos conteúdos de água, proteína, lipídios e carboidratos (Larios *et al.* 2020).

Para a espécie em estudo, os resultados apresentados reforçam as recomendações de Melo *et al.* (2025) do papel do espectro NIR como indicador espectral indireto da qualidade fisiológica de sementes. Tal comportamento ocorre porque as sementes mais vigorosas tendem a apresentar menor reflectância e maior absorção na região do NIR e, portanto, em contraste, sementes de menor vigor exibem maior reflectância no NIR (Figura 4D-E), o que é validado pela forte correlação da reflectância à 780 nm com a germinação e testes de vigor (envelhecimento acelerado e teste de frio) (Figura 9).

Fonseca de Oliveira *et al.*, 2022 relataram que a reflectância de 780 nm foi altamente eficiente na discriminação de diferentes níveis de qualidade fisiológica de sementes de amendoim, evidenciando o potencial dessa banda espectral como ferramenta para avaliação da qualidade fisiológica, pois sementes de alto vigor apresentaram maior reflectância nessa região do espectro. Em contraste, no presente trabalho observou-se o comportamento inverso, sementes de maior qualidade fisiológica apresentaram menor reflectância. Esse resultado, reforça a necessidade de estudos que investiguem a identidade espectral de cada espécie, mesmo para marcadores espectrais de alta relevância.

Além disso, por sofrerem baixa interferência de pigmentos superficiais, descritores na região do NIR são especialmente eficientes na discriminação de lotes com diferenças sutis de vigor, sendo amplamente utilizadas em modelos multivariados aplicados à análise de sementes, como bem explorado para sementes de soja (Silva *et al.*, 2024). Isso pode ser notado pela significativa contribuição da reflectância à 780 e 880 nm na construção do modelo de classificação utilizando PLS-DA que obteve sucesso em separar as três classes de vigor (Figura 7D), o que é uma grande dificuldade no aprendizado de máquinas, uma vez que a classe média tem diferenças sutis e intermediárias complexas a serem mapeadas, tradicionalmente.

Há uma dificuldade em gerar modelos supervisionados de classificação para a qualidade fisiológica de sementes utilizando a reflectância das sementes. O modelo gerado neste estudo, que integra reflectância e autofluorescência contorna esta dificuldade, evidenciando uma maior contribuição na classificação provém da autofluorescência (470/700 nm; Figura 7D), sendo a reflectância (780 nm; Figura 7D) um descritor complementar ao conjunto, o qual deve ser observado (isto é, reflectância e autofluorescência atuam juntas para a performance geral do modelo).

Neste estudo, a emprego de algoritmo baseado em PLS-DA obteve melhor performance entre os modelos testados, embora muito aproximado do uso de RN (Figura 7A-C). Algoritmos baseado em PLS-DA vem sendo empregados com sucesso no desenvolvimento de modelos de

classificação baseados no espectro do NIR, como já reportado para sementes de canola (Melo *et al.*, 2025).

5 CONCLUSÃO

A análise de imagem multiespectral associado ao aprendizado de máquina foi eficiente para discriminação da qualidade fisiológica de sementes de canola.

Os descritores espectrais de reflectância, no comprimento de 780 nm e combinação de autofluorescência 470/500 nm, foram os mais eficientes para discriminação da qualidade fisiológica. O algoritmo PLS-DA apresentou maior eficiência em classificar os lotes, com acurácia superior a 80%.

REFERÊNCIAS

- BARBOZA DA SILVA, C.; OLIVEIRA, N. M.; DE CARVALHO, M. E. A.; et al. Autofluorescence-spectral imaging as an innovative method for rapid, non-destructive and reliable assessing of soybean seed quality. **Scientific Reports**, v. 11, 17834, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97223-5>
- BATISTA, T. B.; MASTRANGELO, C. B.; DE MEDEIROS, A. D.; PETRONILIO, A. C. P.; FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; DOS SANTOS, I. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; AMARAL DA SILVA, E. A. A reliable method to recognize soybean seed maturation stages based on autofluorescence-spectral imaging combined with machine learning algorithms. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 914287, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914287>
- BOCIANOWSKI, J.; LIERSCH, A. Multidimensional analysis of diversity in genotypes of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 633, 2022. DOI: [10.3390/agronomy12030633](https://doi.org/10.3390/agronomy12030633)
- IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E.; APPELLA, C. Descripción de la planta. In: **Cultivo de la colza**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 2008. 156 p. Disponível em: <http://www.inta.gov.ar/barrow/info/documentos/agricultura/colza/nota%20colza.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- DAVIS, J. A. **Elementary survey analysis**. 1. ed. Hoboken, NJ: Prentice-Hall, 1971.
- FONSECA DE OLIVEIRA, G. R.; MASTRANGELO, C. B.; HIRAI, W. Y.; BATISTA, T. B.; SUDKI, J. M.; PETRONILIO, A. C. P.; et al. An approach using emerging optical technologies and artificial intelligence brings new markers to evaluate peanut seed quality. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 849986, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.849986>.
- HILLS, A. E. Spectroscopy in biotechnology research and development. **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry**. p.198–202, 2017. DOI:10.1016/B978-0-12-803224-4.00035-2
- JOVANOVIĆ, I. *et al.* Role of total polyphenol content in seed germination characteristics of spring barley varieties amidst climate change. **Scientific Reports**, v. 14, p. 23818, 2024. DOI: [10.1038/s41598-024-74795-6](https://doi.org/10.1038/s41598-024-74795-6)
- LARIOS, G. *et al.* Soybean seed vigor discrimination by using infrared spectroscopy and machine learning algorithms. **Analytical Methods**, v. 12, n. 35, p. 4303-4309, 2020. DOI: [10.1039/D0AY01238F](https://doi.org/10.1039/D0AY01238F)
- MELO, S. G. F. *et al.* Near-infrared spectroscopy (NIR) for classifying the physiological quality of canola seeds. **Journal of seed science**, v. 47, 2025. DOI:10.1590/2317-1545v47299855
- NOCTOR, G.; REICHHELD, J.; FOYER, C.H. ROS-related redox regulation and signaling in Plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, v.80 p.3-12, 2018. DOI: [10.1016/j.semcdb.2017.07.013](https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.013)

OZAKI, Y.; MCCLURE, W.F.; CHRISTY, A.A. **Near-infrared spectroscopy in food science and technology**. New Jersey: Wiley-Interscience, p.406, 2006. DOI: 10.1002/0470047704

RODRÍGUEZ, M. V. *et al.* Dormancy in cereals (not too much, not so little): about the mechanisms behind this trait. **Seed Science Research**, v. 25, p. 99–119, 2015. DOI: 10.1017/S0960258515000021

SILVA, M. F. *et al.* Near infrared spectroscopy for the classification of vigor level of soybean seed. **Revista Ciência Agronômica**, v. 55, 2024. DOI: 10.5935/1806-6690.20240005.

VISENTAINER, J. V. *et al.* **Canola: a química analítica do processamento aos compostos bioativos**. Appris, 2015.

XIA, Y. *et al.* Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: a review. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 1, p. 35–47, 2019. DOI: 10.1016/j.aiia.2019.05.001.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Oil crops outlook: June 2023. Washington, DC: Economic Research Service, 2023. (OCS-23f).

TERCEIRA PARTE

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de imagens multiespectrais associada ao aprendizado de máquina mostrou-se eficiente na discriminação da qualidade fisiológica de sementes de canola. Os descritores espectrais de reflectância em 780 nm e de autofluorescência na combinação 470/500 nm destacaram-se como os mais relevantes, apresentando relação inversamente proporcional com a germinação e o vigor.

Os modelos de classificação supervisionada permitiram a estratificação dos lotes em baixo, médio e alto vigor, com destaque para o desempenho do algoritmo PLS-DA, evidenciando o potencial da integração dos descritores espectrais na avaliação da qualidade de sementes.

Dessa forma, os resultados obtidos no trabalho evidenciaram o potencial da análise de imagens multiespectrais como ferramenta complementar os métodos tradicionais de avaliação da qualidade de sementes, contribuindo para o avanço do controle de qualidade na cadeia produtiva da canola.

REFERÊNCIAS

- AMBROSE, A. *et al.* High speed measurement of corn seed viability using hyperspectral imaging. **Infrared Physics & Technology**, v. 75, p. 173–179, 2016. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.12.008
- BAEK, I.; *et al.* Rapid measurement of soybean seed viability using kernel-based multispectral image analysis. **Sensors**, v. 19, n. 2, p. 271, 2019. DOI: 10.3390/s19020271
- BEWLEY, J. D. *et al.* **Seeds: Physiology of development, germination and dormancy**. 3rd ed. New York: Springer New York, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-4693-4.
- BOELT, B. *et al.* Multispectral imaging – a new tool in seed quality assessment? **Seed Science Research**, v. 28, p. 222–228, 2018. DOI: 10.1017/S0960258518000235
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Regras para Análise de Sementes (RAS), 2025. In: WikiSDA: Laboratórios – Metodologia – Sementes. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laboratórios/Metodologia/Sementes/RAS_2024 . Acesso em: 31 mai. 2025.
- CANOLA COUNCIL OF CANADA. Canola encyclopedia: history of canola seed development. 2021. Disponível em: <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/history-of-canola-seed-development/>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- CICERO, S. M.; VAN DER SCHOOR, R.; JALINK, H. Use of chlorophyll fluorescence sorting to improve soybean seed quality. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 4, p. 145-151, 2009. DOI: 10.1590/S0101-31222009000400017
- DEMIR, I.; ELLIS, R. H. Changes in seed quality during seed development and maturation in tomato. **Seed Science Research**, v. 2, p. 81–87, 1992. DOI: 10.1017/S0960258500001173.
- DE MORI, C.; TOMM, G. O.; FERREIRA, P. E. P. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2014. 36 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, n. 149). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/988475> . Acesso em: 4 fev. 2026
- FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. **Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. (Documentos, n. 406). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1098452> . Acesso em: 4 fev. 2026
- FRANÇA-SILVA, F. *et al.* Quantification of chlorophyll fluorescence in soybean seeds by multispectral images and their relationship with physiological potential. **Journal of Seed Science**, v. 44, e202244023, 2022. DOI: 10.1590/2317-1545v44258703.
- GULARTE, J. A.; MACEDO, V. G. K.; PANOZZO, L. E. Produção e mercado de sementes de canola no Brasil. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 13, e5834, 2020. DOI: 10.5935/PAeT.V13.e5834

HAY, F. R.; TIMPLE, S.; DUIJN, B. V. Can chlorophyll fluorescence be used to determine the optimal time to harvest rice seeds for long-term genebank storage? **Seed Science Research**, v. 25, p. 321–334, 2015. DOI: 10.1017/S0960258515000082

ISTA, International Seed Testing Association. International Rules for Seed Testing. **International Rules for Seed Testing**, [s. l.], v. 2025, n. 1, p. 1–320, 2025. <https://doi.org/10.15258/istarules.2025.F>

JALINK, H. *et al.* Chlorophyll fluorescence of *Brassica oleracea* seeds as a non-destructive marker for seed maturity and seed performance. **Seed Science Research**, v. 8, p. 437–443, 1998. DOI: 10.1017/s0960258500004402.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. **A alta qualidade da semente de soja: fator importante para a produção da cultura**. Circular Técnica, 136, Embrapa, Londrina, PR, maio, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1091765/1/CT136online.pdf> . Acesso em: 4 fev. 2026

KUMAR, V.; AYDAV, P. S. S.; MINZ, S. Crop seeds classification using traditional machine learning and deep learning techniques: a comprehensive survey. **SN Computer Science**, v. 5, n. 8, p. 1031, 2024. DOI: 10.1007/s42979-024-03379-y

KUSUMANINGRUM, D. *et al.* Nondestructive technique for determining the viability of soybean (*Glycine max*) seeds using FT-NIR spectroscopy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 5, p. 1734–1742, 2018. DOI: 10.1002/jsfa.8646

LI, Z. *et al.* Ethylene-Insensitive is a senescence-associated gene that accelerates age-dependent leaf senescence by directly repressing miR164 transcription in Arabidopsis. **Plant Cell**, v. 25, p. 3311–3328, 2013. DOI: 10.1105/tpc.113.113340

MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015. 660 p.

MASTRANGELO, T. *et al.* Multispectral imaging for quality control of laboratory-reared *Anastrepha fraterculus* (Diptera: Tephritidae) pupae. **Journal of Applied Entomology**, v. 143, p. 1072–1079, 2019. DOI: 10.1111/jen.12716.

NIJËNSTEIN, J. H. Chlorophyll fluorescence as an indicator of seed quality. **ISTA News Bulletin**, n. 147, p. 7–9, 2014.

NOBRE, J. G. S. R. *et al.* Chlorophyll fluorescence in pepper seedlings after seed priming and induction of salt stress. **Revista Ceres**, v. 71, e71032, 2024. DOI: 10.1590/0034-737X2024710032. DOI: 10.1590/0034-737X2024710032

OLIVEIRA, G. R. F. *et al.* Spectroscopy Technologies to Screen Peanut Seeds with Superior Vigor Through “Chemical Fingerprinting”. **Agronomy**, v. 14, n. 11, p. 2529, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14112529.

PENG, Y. *et al.* Classification of tomato seed vitality based on image processing. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, v. 49, n. 2, p. 327–333, 2018. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.042

QIU, G., *et al.* Single-Kernel FT-NIR Spectroscopy for detecting supersweet Corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt) seed viability with multivariate data analysis. **Sensors**, v. 18, n. 4, p. 1010, 2018. DOI: 10.3390/S18041010

QIU, Z. *et al.* Variety identification of single rice seed using hyperspectral imaging combined with convolutional neural network. **Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 212, 2018a. DOI: 10.3390/app8020212

SCHEEREN, B. R. *et al.* Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 3, p. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222010000300004>

SHETTY, N. *et al.* Optimal sample size for predicting viability of cabbage and radish seeds based on near infrared spectra of single seeds. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 6, p. 451–461, 2011. DOI: 10.1255/jnirs.966

SUDKI, J. M. *et al.* Fungal identification in peanuts seeds through multispectral images: Technological advances to enhance sanitary quality. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 1112916, 2023. DOI: 10.3389/FPLS.2023.1112916.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

XIA, Y. *et al.* Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 1, p. 35–47, 2019. DOI: 10.1016/j.aiia.2019.05.001.

YADAV, S. *et al.* Quality improvement of aged cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) seeds using chlorophyll fluorescence sensor. **Scientia Horticulturae**, 189, 81–85, 2015 <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2015.03.043>