

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Agrárias
Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental

**ANÁLISE DO POTENCIAL DA TÉCNICA DE *BIOSPECKLE* LASER APLICADO
COMO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA A AVALIAÇÃO DE GERMINAÇÃO
DE SEMENTES AGRÍCOLAS**

ARARAS
2026

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Agrárias
Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental

**ANÁLISE DO POTENCIAL DA TÉCNICA DE *BIOSPECKLE* LASER APLICADO
COMO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
GERMINATIVO DE SEMENTES AGRÍCOLAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao Departamento de Recursos Naturais e
Proteção Ambiental da Universidade Federal
de São Carlos, para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan Gazzola

Co-Orientador: Prof. Dr. Adilson Machado
Enes

ARARAS

2026

Nepomuceno., Kaio Socorro Dias

Análise do potencial da técnica de biospeckle laser aplicado como ensaio não destrutivo para a avaliação de germinação de sementes agrícolas. / Kaio Socorro Dias Nepomuceno. -- 2026.
42f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras
Orientador (a): Jonathan Gazzola
Banca Examinadora: Fernando César Sala, Márcia Maria Rosa Magri
Bibliografia

1. Laser na agricultura. 2. Tecnologia de sementes. I. Nepomuceno., Kaio Socorro Dias. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Carlito e a minha mãe Cleide, que sempre entenderam minhas escolhas, sempre me deram educação e orientação e sempre deixaram claro o quão sortudo e amado sou!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre se fazer presente na minha vida e sempre clarear o caminho por onde eu passo.

Agradeço ao meu pai que sempre fez de tudo para me proporcionar o melhor que o mundo tem a me oferecer e por me deixar claro que eu sempre poderei contar com a sua ajuda e o seu ombro amigo. Para que eu pudesse estar em uma sala de aula climatizada estudando, o meu pai esteve por muito tempo no Sol suando, sempre serei grato por isso e buscarei de todas as formas fazer valer a pena, para que todo o conforto que ele me proporcionou, eu retribua em dobro.

À minha mãe por toda educação e orientação que me forneceu, criando a minha base e me transformando no homem que sou hoje. Nunca me esquecerei de todos os conselhos que me deu e de todos os dias que me levava para escola, mesmo cansada, mesmo com dores e mesmo na chuva.

À minha irmã que, mesmo pequenina e sofrendo com nossa separação de cidade, entendeu que precisávamos passar por isso para mais adiante vivermos mais próximos do que nunca!

Ao meu namorado e companheiro que está comigo em todos os momentos e é uma pessoa que posso contar em qualquer situação. Agradeço pela sua paciência, pelo seu amor e por caminhar ao meu lado, sempre buscando que a gente evolua e conquiste juntos tudo aquilo que almejamos

Sendo assim, deixo claro minha gratidão e forte amor a essas 4 pessoas da minha família que são a base de todas as minhas escolhas.

Aos meus amigos Ádely, Analice, Elaine, Elisa, Evellyn, Felipe, Jackeline, Rayani, e outros amigos que foram essenciais durante toda minha graduação e terão para sempre sua importância em minha vida.

Ao meu orientador, Jonathan Gazzola, que desde o início me motivou a trabalhar com ele e o grupo e, desde então, fez de tudo para que eu alcançasse meus resultados da melhor forma possível, fornecendo todo suporte que precisei e sanando todas minhas dúvidas com muita paciência e compreensão. Ainda, agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Adilson Enes, que contribuiu de forma significativa para este trabalho.

RESUMO

As sementes agrícolas são de grande importância para o agronegócio do Brasil, bem como para a economia e segurança alimentar do país. Nesse âmbito, a cultura da soja (*Glycine max*) e a cultura do milho (*Zea mays*) se destacam. Dessa forma, garantir o plantio de sementes viáveis é imprescindível para uma boa produtividade. A boa qualidade das sementes utilizadas responde diretamente a uma boa produção, sendo assim, as formas de avaliar a viabilidade de sementes é um passo crucial para o sucesso do agronegócio no Brasil e garantir que a qualidade de germinação seja assegurada para o produtor. Nesse sentido, existem testes que buscam verificar a viabilidade germinativa das sementes, como é o caso do teste de germinação padrão ou o teste utilizando tetrazólio. Entretanto, esses testes podem ser destrutivos e são feitos a partir de amostras, o que pode aumentar a imprecisão dos resultados. Logo, um método de análise de qualidade de germinação que seja não destrutivo, rápido e capaz de analisar as sementes de forma individual é algo desejável. O presente trabalho de conclusão de curso objetivou analisar a técnica de *BioSpeckle* Laser, cuja características acima desejadas podem ser contempladas. Tal técnica faz uso de um laser que espalha ou transmite feixe de luz. A reflexão da luz laser sobre o tecido vegetal foi coletada por uma câmera CCD e armazenada para processamento, feito através de um algoritmo específico. Dados quantitativos foram obtidos através da técnica de determinação de “Momento de Inércia” (MI) para processamento das imagens, pois torna possível analisar a atividade biológica do material através da determinação do índice de MI e passível de identificar anormalidades no funcionamento das células, verificando assim a viabilidade e qualidade de uma semente. Os corpos de prova foram compostos por sementes de soja e milho que foram armazenadas em condições ideais e em condições não ideais, provocando variações na qualidade de germinação entre sementes. Os resultados obtidos foram analisados através de gráficos e testes estatísticos, como o teste de análise de variância (ANOVA). Como resultados, concluiu-se que a diferenciação do modo de armazenagem das sementes gerou diferenças significativas para o estudo e, a técnica do *BioSpeckle* laser mostrou-se capaz de identificar as diferenças do potencial germinativo das sementes de soja e milho.

Palavras-chave: Qualidade de sementes; Germinação; Laser na agricultura; *BioSpeckle*.

ABSTRACT

Agricultural seeds are of great importance to Brazilian agribusiness, as well as to the country's economy and food security. In this context, soybean (*Glycine max*) and corn (*Zea mays*) crops stand out. Therefore, ensuring the planting of viable seeds is essential for good productivity. The high quality of the seeds used directly contributes to good production; thus, the methods used to evaluate seed viability represent a crucial step for the success of agribusiness in Brazil and for ensuring that germination quality is guaranteed for producers. In this regard, there are tests aimed at verifying the germinative viability of seeds, such as the standard germination test and the tetrazolium test. However, these tests can be destructive and are performed using samples, which may increase the imprecision of the results. Thus, a method for analyzing germination quality that is non-destructive, rapid, and capable of analyzing seeds individually is desirable. This undergraduate thesis aimed to analyze the BioSpeckle Laser technique, whose desired characteristics mentioned above may be achieved. This technique uses a laser that scatters or transmits a beam of light. The reflection of the laser light on the plant tissue was collected by a CCD camera and stored for processing, which was performed using a specific algorithm. Quantitative data were obtained through the "Moment of Inertia" (MI) determination technique for image processing, as it makes it possible to analyze the biological activity of the material through the determination of the MI index and to identify abnormalities in cell functioning, thus verifying the viability and quality of a seed. The test specimens consisted of soybean and corn seeds that were stored under ideal and non-ideal conditions, causing variations in germination quality among the seeds. The results obtained were analyzed using graphs and statistical tests, such as analysis of variance (ANOVA). As a result, it was concluded that the differentiation in the seed storage method generated significant differences for the study, and the BioSpeckle Laser technique proved capable of identifying differences in the germinative potential of soybean and corn seeds.

Keywords: Seed quality; Germination; Laser in agriculture; BioSpeckle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arranjo Experimental para ensaio de <i>BioSpeckle</i>	19
Figura 2. Equipamentos alocados no setup.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 3. Ensaio de potencial germinativo para sementes de soja. a) armazenamento condições ideais; b) armazenamento em condições não ideais.	29
Figura 4. Ensaio de potencial germinativo para sementes de milho. a) armazenamento condições ideais; b) armazenamento em condições não ideais.	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Validação do ensaio experimental com sementes de milho.	24
Gráfico 2. Validação do ensaio experimental com sementes de soja.	24
Gráfico 3. Momento de Inércia para sementes de soja que foram armazenadas de forma ideal.	25
Gráfico 4. Momento de Inércia para sementes de soja que foram armazenadas de forma não ideal.....	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 5. Momento de Inércia para sementes de milho que foram armazenadas de forma ideal.	26
Gráfico 6. Momento de Inércia para sementes de milho que foram armazenadas de forma não ideal.....	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 7. Média e Desvio Padrão obtidos a partir do M.I. de sementes de soja, germinadas e não germinadas.	35
Gráfico 8. Média e Desvio Padrão obtidos a partir do M.I. de sementes de milho, germinadas e não germinadas.....	36
Gráfico 9. Curva ROC do Momento de Inércia para discriminação entre sementes de soja germinadas e não germinadas	38
Gráfico 10. Curva ROC do Momento de Inércia para discriminação entre sementes de milho germinadas e não germinadas.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teste de Análise de Variância para sementes de soja em condições de temperatura de armazenamento diferentes.....	27
Tabela 2. Teste de Análise de Variância para sementes de milho em condições de temperatura de armazenamento diferentes.....	27
Tabela 3. Momento de Inércia e condição de germinação para sementes de soja.	31
Tabela 4. Momento de Inércia e condição de germinação para sementes de milho.	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
2.	OBJETIVOS	14
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
4.	MATERIAL E MÉTODOS	18
5.	DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	24
6.	CONCLUSÃO	40
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A produção agrícola sofre pressão constante sobre o atendimento de demandas de alimentos e nutrição de animais perante a uma população cada vez maior e, nesse sentido, a qualidade de sementes é um ramo de controle essencial para garantir uma boa produção. Diante disso, a capacidade de se reduzir incertezas na escolha de semente e no plantio assume um papel fundamental, principalmente ao envolver culturas de grande expressão nacional, como soja e milho, onde pequenas variações na qualidade do material propagativo podem representar impactos técnicos e econômicos relevantes (BIGOLIN *et al.*, 2022).

Nesse cenário, a avaliação do potencial germinativo de sementes garante maior segurança no processo de plantio, uma vez que está amarrado à capacidade de originar plântulas normais, vigorosas e uniformes (SCATOLIN *et al.*, 2018), onde a utilização de sementes com menor capacidade germinativa pode provocar emergência desuniforme, redução no estabelecimento de plantas e maior insegurança na implantação da lavoura (BIGOLIN *et al.*, 2022). Sendo assim, é necessário tratar as sementes agrícolas como um insumo estratégico, usando de tecnologias que garantam a boa produção de forma eficaz e sem causar perda de materiais.

Os métodos atuais pelo qual se avalia a viabilidade de sementes mostram-se importantes para o processo de produção, mas, tanto o teste padrão de germinação, quanto o teste de germinação utilizando tetrazólio, são testes que utilizam amostras de sementes, sendo inviável a avaliação individual de todas as sementes a serem utilizadas em um plantio, o que pode gerar imprecisão nos resultados observados no campo (Grasso, 2018). Além disso, são métodos considerados destrutivos, uma vez que os materiais utilizados nos testes são normalmente descartados.

Diante do exposto, há necessidade de desenvolver métodos alternativos que sejam rápidos, objetivos e capazes de auxiliar a tomada de decisão no controle de qualidade de sementes, possibilitando a avaliação individual de sementes de forma facilitada e não destrutiva. Nesse contexto, métodos ópticos vêm ganhando importância por permitirem a obtenção de informações sobre o estado fisiológico do material sem causar danos à sua estrutura.

Entre essas metodologias, destaca-se o uso do laser, que possibilita avaliar alterações dinâmicas em materiais biológicos a partir da interação da luz com os tecidos analisados. Quando o feixe laser incide sobre uma superfície biológica, ocorre a formação de um padrão de interferência denominado speckle, composto por regiões claras e escuras geradas pelo

espalhamento da luz. Em materiais biologicamente ativos, esse padrão apresenta variações ao longo do tempo, pois está relacionado a micromovimentos internos associados a processos fisiológicos, como respiração, absorção de água, mobilização de reservas, atividade enzimática e demais reações metabólicas. Dessa forma, a análise temporal dessas variações permite estimar o nível de atividade biológica do material, possibilitando diferenciar sementes com maior ou menor potencial fisiológico. No caso das sementes, essa abordagem torna-se relevante porque permite avaliar individualmente cada unidade, contribuindo para a identificação de materiais viáveis, deteriorados ou com menor atividade metabólica, sem a necessidade de destruir a amostra. Assim, o uso dessa técnica pode complementar os testes convencionais de germinação e vigor, oferecendo uma alternativa sensível, rápida e promissora para estudos relacionados à qualidade fisiológica de sementes. A técnica de BioSpeckle laser é uma tecnologia que vem sendo explorada e merece um destaque, onde ao utilizar uma fonte luminosa em materiais biológicos pode-se obter resultados de acordo com as alterações temporais na atividade biológica e no metabolismo de plantas, o que pode ser utilizado para aferir o potencial de uma semente germinar, sendo possível identificar anormalidades nos materiais (RABELO, 2000).

Assim, analisar a técnica de *BioSpeckle* aplicada à avaliação da capacidade de germinação de sementes pode garantir um novo método ao ramo da tecnologia de sementes de garantir uniformidade na produção agrícola, de forma rápida e sem descarte desnecessário de materiais.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Este trabalho teve como objetivo analisar a aplicabilidade da técnica de *BioSpeckle* laser para avaliação não destrutiva do potencial germinativo de sementes de soja e milho, com intuito de contribuir para desenvolvimento de novos métodos alternativos para avaliação da qualidade de sementes com a vantagem de ser um método rápido e não destrutivo.

Objetivos específicos:

Para atingir o objetivo geral do trabalho, algumas etapas deverão ser realizadas, como segue listado abaixo:

- Fazer a validação do arranjo experimental;
- Armazenar as sementes nas condições impostas;
- Aplicar o ensaio de BSL nas amostras, captando as imagens da refração da luz laser sobre a amostra;
- Processar as imagens captadas através de algoritmo específico;
- Obter valores de Momento de inércia de sementes de soja e milho armazenadas em temperatura ideal para continuar com boa capacidade de germinação;
- Obter valores de Momento de inércia de sementes de soja e milho armazenadas em temperatura inadequada;
- Encaminhar as sementes mantidas em temperatura ideal e as mantidas em temperaturas não controladas para teste padrão de germinação;
- Comparar os resultados obtidos pela técnica de BSL com os resultados do teste padrão de germinação;
- Testar a capacidade de provar uma diferenciação entre sementes viáveis e inviáveis através do *BioSpeckle*;
- Analisar os dados estatísticos de Momento de Inércia para comprovar a hipótese apresentada.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A cultura do milho e a cultura da soja são de extrema importância para a segurança alimentar e desenvolvimento econômico do Brasil. O milho se destaca como um dos principais grãos comerciais da América e várias são as formas de sua utilização, indo da alimentação direta e animal até as indústrias de alta tecnologia (ALMEIDA, 2024). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2026), o milho ocupa o segundo lugar como o cereal mais produzido no Brasil e é o terceiro mais produzido no mundo, onde no Brasil é cultivado principalmente em dois períodos do ano, denominadas safra e safrinha.

A soja também é um grão que apresenta grande versatilidade quanto ao seu uso, onde destacam-se a obtenção do farelo de soja, óleo de soja bruto e óleo de soja refinado, portanto, atuando diretamente na alimentação animal e na alimentação humana (FONTES, 2019), possuindo grande relevância para o crescimento da economia do Brasil (EMBRAPA, 2021), onde destaca-se por ser o produto de maior volume de produção entre os grãos e é o produto com maior representação no agronegócio do país (RAMOS *et. al.*; 2020).

O cultivo do milho e da soja é realizado por meio de sementes e, dessa forma, esse insumo é o mais importante no sistema de produção agrícola dessas culturas. Logo, é de extrema importância garantir que o plantio dessas sementes tenha uma boa capacidade de germinação. A baixa qualidade fisiológica das sementes de milho pode comprometer diretamente o estabelecimento do estande, reduzindo o potencial produtivo dessa cultura, visto que sementes com maior capacidade de germinar favorecem a emergência inicial, resultando em ganhos na produtividade, onde o aumento de 1 ponto percentual no nível de germinação das sementes plantadas pode resultar em um incremento de 43,5 kg ha⁻¹ na produção, gerando um aumento de 63 plantas por ha⁻¹ (REIS, 2021). O mesmo cenário se repete para a cultura da soja, onde a utilização de sementes com baixa capacidade de germinação pode reduzir o rendimento de grãos, pois compromete o estabelecimento inicial das plantas e a formação adequada na lavoura, onde a utilização de semente com uma boa germinação pode gerar um incremento de até 20% quando comparado com sementes de baixa capacidade de germinar (STRUKER, 2019).

O ramo da tecnologia de sementes busca garantir maiores percentuais de germinação de sementes e isso é essencial para sementes de plântulas alimentícias, visto que sementes com um baixo nível de germinação impacta drasticamente na produtividade final, como é de exemplo a perda drástica ocorrida na cultura do milho, divulgada pela Emater em 2024, onde a falta de germinação teve grande impacto. Além disso, a emergência lenta ou desuniforme de

grãos pode também propiciar maior ataque por pragas ou patógenos, como também menor tolerância a variações naturais do ambiente, como por exemplo uma mudança de temperatura (NETO, 2023).

A busca por sementes de qualidade garante maior produtividade no campo e melhores resultados em experimentos, e, diante disso, o potencial germinativo é o principal objetivo da tecnologia de sementes (FILHO, 2005), já que compreende o poder intrínseco de uma semente germinar e se desenvolver em ambientes adequados (FILHO, 2005). A germinação das sementes, entretanto, pode ser afetada por diversos fatores, como é o exemplo da disponibilidade de água, a temperatura em que se é armazenada, o oxigênio envolvido no momento de germinação e, a luz (no caso de plantas fotoblásticas facultativas, que é o caso da maioria das espécies) (VIEIRA, 2023).

Diante do exposto, métodos de avaliação da germinação de sementes são necessários para garantir a qualidade das mesmas e aumentar a produtividade em campo. Sendo assim, o teste de germinação padrão permite de forma prática testar a germinação de sementes, podendo ser feito em um ambiente com condições adequadas para os desenvolvimentos das plântulas, controlando a disponibilidade de água, temperatura e ações diversas do ambiente (FRANÇA-NETO, 2018). O mesmo autor ainda aponta que o teste de germinação padrão é caracterizado por demandar um tempo significativo, a depender de cada espécie, pois compreende o tempo específico de germinação em determinadas condições, bem como, os custos envolvidos com mão-de-obra e materiais para sua realização.

Outro meio pelo qual se avalia a capacidade germinativa de sementes é o teste que utiliza tetrazólio. Esse teste apresenta um alto nível de precisão e confiabilidade (FRANÇA-NETO, 2018) e permite diferentes níveis de viabilidade e vigor, fornecendo um diagnóstico das possíveis causas da redução da qualidade de sementes, entretanto, tal método requer treinamento especial sobre estrutura embrionária de sementes e de técnicas de interpretação, além de ser um teste que demanda de um tempo maior de estudo (FRANÇA-NETO, 2018). Fora isso, o teste de germinação padrão é considerado um método destrutivo, pois inviabiliza o uso posterior das sementes avaliadas. Ainda, é fato de que tanto essa técnica avaliativa, quanto o teste de tetrazólio são realizados com base em amostras representativas de um lote, o que pode gerar imprecisões nos resultados (GRASSO, 2018). Essas limitações não são positivas para a produção de sementes com qualidade e para as indústrias de tecnologia de sementes.

Sendo assim, novos métodos de avaliação vêm sendo estudados e um que merece destaque é a técnica de *BioSpeckle* laser, o qual se utiliza de uma fonte luminosa (laser) para

obter alterações temporais na atividade biológica e no metabolismo de plantas. O *Biospeckle* já vem sendo estudado e aplicado para verificar a viabilidade de sementes. Os primeiros trabalhos exploratórios da técnica foram sobre sementes de feijão que, com avanços foi possível afirmar que tal método não invasivo foi possível para avaliar a capacidade de germinação de sementes, além de ser viável também determinar o efeito da umidade na atividade biológica e detectar patógenos (RODRIGUES, 2005; BRAGA, 2005). Rabelo (2000) explica que, quando a luz emitida pelo laser chega a penetrar um material biológico de interesse ele sofre espalhamentos múltiplos nas estruturas microscópicas da superfície em que se faz o estudo. A reflexão da luz laser, captada por câmera e, adequadamente processada, permite obter um índice denominado como Momento de Inércia (MI) e, suas variações permite identificar anormalidades encontradas correspondente à atividade biológica da semente em que se estuda (VICENTINI, 2023).

Diversos trabalhos demonstraram a eficiência do uso da técnica de *BioSpeckle* Laser na análise do poder germinativo de sementes. Vivas (2015) aplicou a técnica como uma ferramenta de diagnose precoce na avaliação da qualidade das sementes de café e obteve resultados satisfatórios permitindo classificar as sementes viáveis para plantio em um prazo menor que os testes de germinação padrão e mais eficiente que a técnica do tetrazólio. Fracarolli (2011) buscou utilizar o *BioSpeckle* na avaliação do potencial germinativo de sementes de ipê-roxo e, ela concluiu que a técnica é viável para avaliar potencial germinativo das sementes dessa espécie em um tempo mais curto que os testes de germinação padrão (21 dias aproximadamente).

Além disso, há trabalhos mais recentes e avançados que têm buscado desenvolver equipamentos que tornem essa técnica mais prática e aplicável em condições de campo. Nesse contexto, Vicentini (2023) desenvolveu e validou um protótipo portátil para análise de sementes de soja por *Biospeckle* Laser, onde conclui que um objeto menor e portátil apresentou resultados equivalentes ao *setup* tradicional, tanto para sementes viáveis quanto para sementes envelhecidas artificialmente, podendo já ser uma alternativa potencialmente viável aos testes tradicionais.

De acordo com o que foi exposto acima, o presente trabalho objetiva analisar a viabilidade do uso da técnica de *Biospeckle* para determinação do potencial germinativo de sementes de milho e soja. Tal trabalho procura analisar a confiabilidade dos índices de MI, resultantes da reflexão de luz laser sobre as sementes na detecção do poder germinativo das sementes de soja e milho. Os resultados desse trabalho podem gerar uma nova técnica para

avaliação do poder germinativo de sementes que obtenha dados de forma rápida e não destrutiva, capaz de ser aplicada individualmente nas sementes.

4. MATERIAL E MÉTODOS

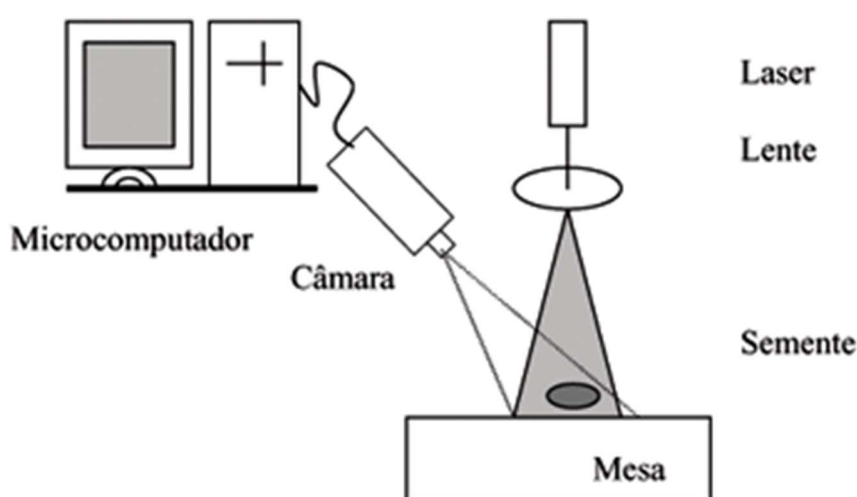
O trabalho de pesquisa foi realizado em seis etapas distintas, sendo elas: 1 - Armazenamento das sementes de soja e milho; 2 - Ensaio de validação do arranjo experimental a ser adotado; 3 - Ensaio experimental aplicando a técnica de *BioSpeckle Laser*, sobre as sementes; 4 - Processamento de imagens e obtenção dos dados quantitativos; 5 – Ensaio experimental de germinação para efeitos de comparação; 6 - Análise estatística dos dados.

A primeira etapa compreendeu o armazenamento das sementes e buscou obter amostras com qualidades diferentes de germinação. Para tal, as sementes foram armazenadas de forma adequada e inadequada, referente a temperatura e umidade de armazenamento. Nessa etapa foram selecionadas 40 sementes de soja e 40 sementes de milho, sendo que destas, 20 foram armazenadas em temperatura ideal e 20 de forma inadequada. A temperatura ideal para armazenar sementes é um dos principais pontos para manter as sementes viáveis e evitar deterioração das mesmas (Henning, 1984). Sendo assim, as sementes de soja foram armazenadas em uma câmara de germinação do Núcleo de Extensão e Pesquisa em Agricultura Sustentável do CCA/UFSCar, em temperaturas mais baixas, entre 10°C e 12°C e com teores de umidade entre 11% e 13%, conforme recomendado por Cardoso (2004), pois são nessas condições que as sementes de soja permanecem por um tempo maior sem a perda de viabilidade. As sementes de milho também foram armazenadas em câmara fria, pois quando armazenadas por um período mais longo, também devem ser armazenadas em temperaturas baixas, variando entre 10°C e 15°C (Heberle, 2019), onde a qualidade fisiológica não se altera de forma significativa.

Concomitantemente, os outros lotes das sementes de soja e milho foram mantidos em condições desfavoráveis, com temperaturas mais altas, variando entre 25°C e 30° propiciando a deterioração das sementes de soja (Cardoso, 2004), por um período de 90 dias, diminuindo assim seu potencial germinativo. Para tanto, as sementes de ambas as culturas foram armazenadas em condições controladas nos dois casos, sendo que para as condições ideais de armazenamento foram mantidas em câmara fria de armazenamento e, as em condições inadequadas, foram armazenadas em câmara climatizada e ajustada para uma temperatura maior, buscando manter sempre entre 25°C e 30°C.

A segunda etapa compreendeu os ensaios experimentais ópticos de *BioSpeckle Laser* (BSL) sobre as sementes a serem germinadas. Assim, essa etapa foi realizada no Laboratório de Análise Sensorial, locado no CCA/UFSCar, com ambiente climatizado e totalmente ausente de iluminação, ruídos e vibrações. O embasamento metodológico para o procedimento experimental utilizando a técnica de BSL seguiu as recomendações feitas por Enes (2013) e necessitou do uso de: Luz Laser tipo diodo 635 nm vermelha, videocâmera CCD, tripé de suporte para videocâmera, lentes convexas de 125 mm e 250 mm, base de suporte óptico, suportes físicos para a luz laser, conjunto de sementes de soja e milho e papel embebido em álcool. A Figura 01 ilustra o arranjo experimental para realização do ensaio de *BioSpeckle Laser*.

Figura 1. Arranjo Experimental para ensaio de *BioSpeckle*.



Fonte: Enes et al., 2022.

Os equipamentos foram alocados, sendo que o setup adotou um posicionamento no espaço onde a régua (suporte físico óptico) foi alocada a 3,7 cm da parede, o laser alocado no início da régua e sua ponta de luz ficando na posição 500 mm indicados na régua. As lentes plano convexas de 125 mm e 250 mm foram alocadas no ponto 400 mm e 275 mm da régua. A câmera ficou a 95 cm de distância do ponto de saída do laser e 25 cm de distância do suporte que tinham as sementes. O tempo adotado para exposição da semente sob a Luz Laser foi de 35 segundos.

Seguindo essas recomendações, realizou-se um teste para validação do ensaio experimental, utilizando sementes de milho, de soja e um papel embebido em álcool. Essa etapa

analisou os dados de MI das sementes em relação ao papel embebido em álcool. A validação experimental foi aprovada quando os resultados de MI demonstraram uma diferença tal que o *setup* adotado seja hábil em captar a variação de reflexão da luz Laser entre sementes e o papel. Essa diferenciação é importante de ser feita previamente, pois indica se há uma variação do movimento das intensidades luminosas granulares da reflexão laser entre as amostras a serem analisadas e o papel embebido em álcool que, devido a uma evaporação mais intensa que as sementes, deve, em tese, indicar um MI diferenciado e de maior magnitude. A videocâmera foi ajustada para captar vídeos de resolução 640-480 pixels em cada etapa de análise. Cada amostra foi iluminada pela luz laser durante um determinado tempo e a reflexão captada pela câmera durante esse tempo. Para cada tipo de grão analisado, foram empregadas 12 sementes. Os registros de reflexão foram feitos continuamente, sem pausar o vídeo, sendo apenas separados entre tipos de grãos analisados. Logo, essa etapa foi feita em dois “takes”. Após a etapa de tomada de imagens, os vídeos passaram por um processamento de imagens para determinação do seu MI. As imagens foram processadas por um algoritmo em uma central, localizado no Laboratório de Prototipagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Sergipe. A variação desse índice serviu como um indicativo da vitalidade do grão e a validação experimental serviu para que se certificasse que a posição dos equipamentos e o ponto onde se captou as imagens seria possível de se obter a variação da refração luminosa, o qual geraria o padrão *BioSpeckle*.

Após validação do ensaio experimental, iniciou-se a etapa de aplicação do BSL nas amostras de milho e soja, objetos dessa pesquisa, aplicando o mesmo procedimento metodológico para as sementes armazenadas em condições ideais e não ideais. Tais amostras foram iluminadas pela luz Laser e sua imagem foi gravada em forma de vídeo para posterior processamento. Posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado com as sementes que foram armazenadas em condições não ideais. A captação de imagens foi realizada através do uso da videocâmera CCD, através de “takes” tomados de forma contínua para cada caso analisado. As imagens gravadas foram usadas no processamento digital das mesmas para obtenção do seu momento de inércia (MI). As sementes foram numeradas para que o MI pudesse ser comparado com o teste de germinação. Esse dado foi utilizado para comparação com os testes padrão de germinação para se estabelecer uma relação entre o nível de atividade biológica e o percentual de germinação dessas sementes quando expostas a condições favoráveis para germinação.

Com os dados coletados e registrados, iniciou-se então a quarta etapa do experimento, caracterizada pelo processamento de imagens. Esse procedimento foi realizado seguindo as

recomendações feitas por Enes (2011). Para tal, foi utilizado o software GNU Octave (versão 8.2.0) e algoritmos implementados em sua arquitetura para realizar a análise de imagens para calcular o Momento de Inércia (MI) de uma sequência de imagens empilhadas, obtidas de um diretório específico. O *software* divide o vídeo de entrada em frames individuais para que fosse possível realizar a análise em cada quadro separadamente. Os frames individuais foram então armazenados no diretório chamado “frames” dentro da pasta de processamento. Em seguida, o algoritmo leu as imagens do diretório "frames" e as concatenadas em um *stack*, que é uma estrutura 3D. O *stack* conterà a sequência de imagens empilhadas, representando diferentes momentos de tempo ou quadros. Posteriormente, foram obtidos o tamanho das imagens (altura e largura) e a dimensão do *stack* (número de imagens empilhadas). O algoritmo definiu um tamanho padrão (512 pixels) para a altura das imagens utilizadas na análise (stsHeight). Caso a largura da imagem fosse menor que 512 pixels, a altura foi então ajustada para ser igual à largura da imagem, garantindo que a região de interesse (ROI) pudesse ser quadrada. A região de interesse (ROI) foi extraída do centro de cada imagem empilhada, para calcular o STS (*Slice Time Series*). O STS foi uma sequência de linhas verticais retiradas das imagens empilhadas, representando a evolução temporal da intensidade dos pixels na região central das imagens, conforme a equação 1.

$$STS_{x,t} = \text{Intensidade do pixel na posição } x \text{ no quadro } t. \quad (1)$$

Com o STS definido, o algoritmo calcula a Matriz de Ocorrências (MOC) para analisar a correlação entre as intensidades dos pixels em quadros adjacentes do STS. A MOC é uma matriz 256x256, onde cada elemento representou a quantidade de ocorrências de uma intensidade de pixel em relação à intensidade do pixel no quadro seguinte (equação 2).

$$MOC_{i,j} = \text{Qtde de ocorrências de } i \text{ em relação à } j \text{ no quadro seguinte.} \quad (2)$$

O MI (Momento de Inércia) foi calculado a partir da MOC, representando a variação média da intensidade dos pixels entre os quadros adjacentes do STS. Quanto maior o valor do MI, maior foi a variação da intensidade entre os quadros. O cálculo do MI foi realizado com base na equação 3. Dessa forma, o Momento de Inércia calculado permitiu a análise temporal das imagens e a quantificação da variação de intensidade dos pixels ao longo do tempo

$$MI = 1N_i = 1256j = 1256MOC_{i,j}*(i-j)^2 \quad (3)$$

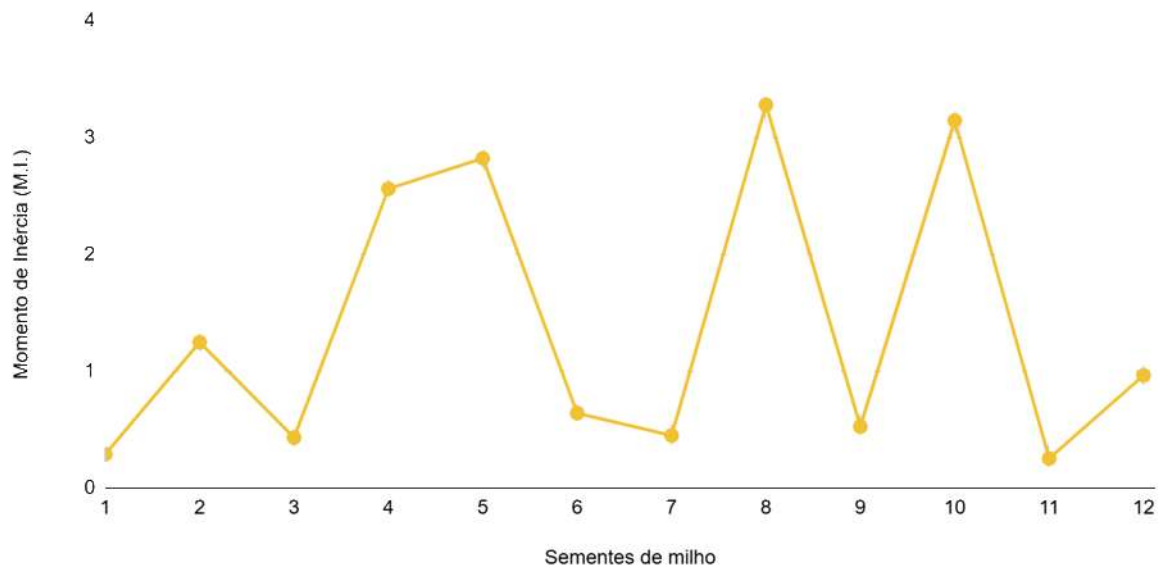
A quinta etapa correspondeu ao teste de germinação da forma padrão para as sementes das duas culturas, utilizando os lotes armazenados corretamente e os lotes armazenados de forma incorreta. O teste de germinação foi o meio adotado pelo qual se avaliou a capacidade das sementes produzirem plântulas normais em condições ideais (Silva, 2016). Dessa forma, o teste foi feito utilizando papel para germinação de sementes (germitest) umedecidos segundo critério das Regras para Análise de Sementes (RAS) e levados a uma Incubadora BOD com Fotoperíodo SL sob temperatura controlada a 26°C. O processo de germinação foi acompanhado todos os dias e a germinação ocorreu entre 4 e 7 dias (Silva, 2016), onde foram consideradas sementes germinadas apenas aquelas que apresentarem estruturas essenciais, sendo o sistema radicular e/ou a parte aérea, ou seja, após 7 dias desde à exposição das sementes ao germinador, as sementes que não apresentaram essas estruturas foram identificadas como não germinadas.

Com os dados de MI determinados e com os testes de germinação já concluídos, foi iniciada a sexta e última etapa relacionada aos testes estatísticos. A metodologia de análise estatística para este estudo consiste em um primeiro momento realizou uma análise de distribuição dos dados do Momento de Inércia (MI) obtidos a partir das diferentes sementes analisadas, fazendo uso de valores médios, bem como a mediana, o desvio padrão e as distribuições de frequência, apresentando esses resultados através de métodos gráficos. Também foi realizado a Análise de Variância (ANOVA) de um fator para identificar diferenças significativas no Momento de Inércia (MI) entre as sementes de soja e milho armazenadas corretamente e as sementes armazenadas em condições não ideais. Além disso, elaboraram-se curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para sementes de soja e de milho, considerando-se como condição positiva a germinação no ensaio padrão. Para distintos pontos de corte do Momento de Inércia, estimaram-se a sensibilidade e a taxa de falsos positivos, visando avaliar a capacidade discriminatória do MI em distinguir sementes germinadas de não germinadas. Com os dados estatísticos determinados, foram plotados gráficos de dispersão e *boxplots*, para visualizar as diferenças entre os grupos de sementes e a variabilidade dos valores de MI. Esse último passo irá fornecer uma interpretação objetiva dos resultados, permitindo realizar uma comparação e discussão das implicações práticas e a relevância dos achados para a diferenciação de forma rápida e não destrutiva de sementes viáveis e sementes não viáveis de soja e milho.

5. DISCUSSÃO E RESULTADOS

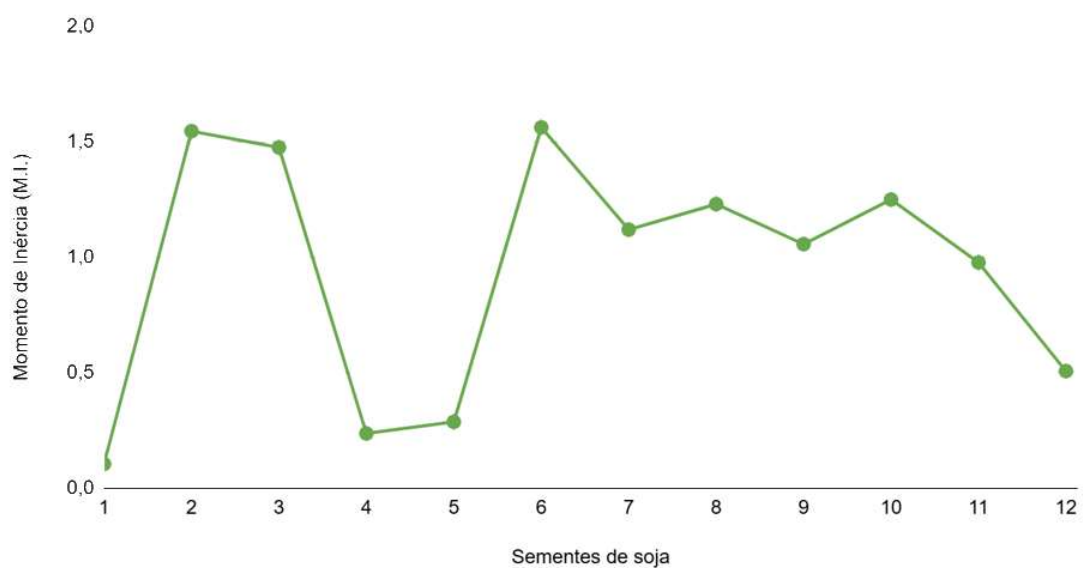
Os gráficos 01 e 02 mostram o momento de inércia obtido para validação do arranjo experimental de BSL para as sementes de milho e soja, respectivamente.

Gráfico 1. Validação do ensaio experimental com sementes de milho.



Fonte: acervo pessoal, 2025.

Gráfico 2. Validação do ensaio experimental com sementes de soja.

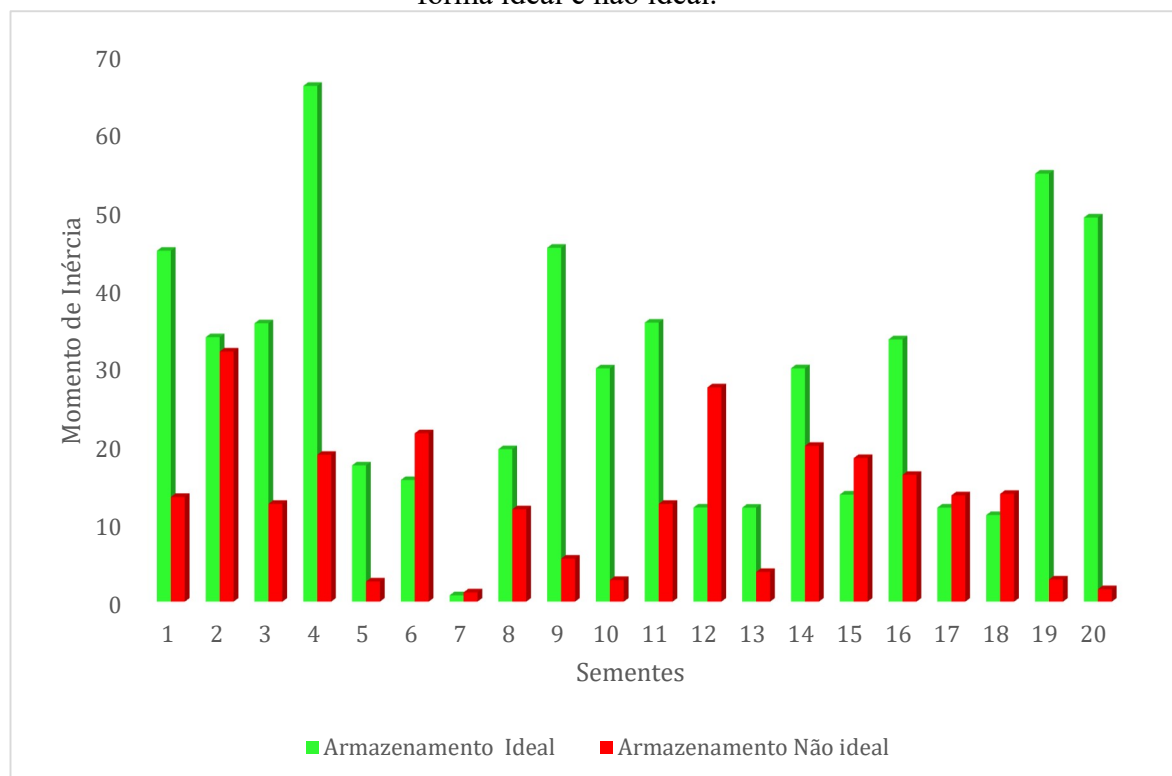


Fonte: acervo pessoal, 2025.

Os dados obtidos no ensaio de validação do arranjo experimental mostram que os valores de M.I. para o milho variaram de 0,252058 a 3,282208 com uma média final de 1,384600167. Para as sementes de soja, os valores de M.I. variaram de 0,105099 a 1,56284 onde a média final foi de 0,94655775. O papel embebido em álcool apresentou um M.I. de 5,209792. Assim, com esses resultados podemos concluir que se observou estabilidade nos resultados, já que os valores foram consistentes para as sementes de milho e soja, o que sugere uma estabilidade no processo de aquisição de dados, indicando que o arranjo experimental pode ser confiável para esses casos. A sensibilidade do método para detectar mudanças pode ser útil na identificação da viabilidade de sementes de milho e soja, mas é preciso considerar possíveis variações naturais nos resultados. Tudo isso indica que o *setup* e o tempo de exposição da semente sob a Luz Laser foram promissores para investigar sementes, possibilitando a continuidade das etapas do projeto.

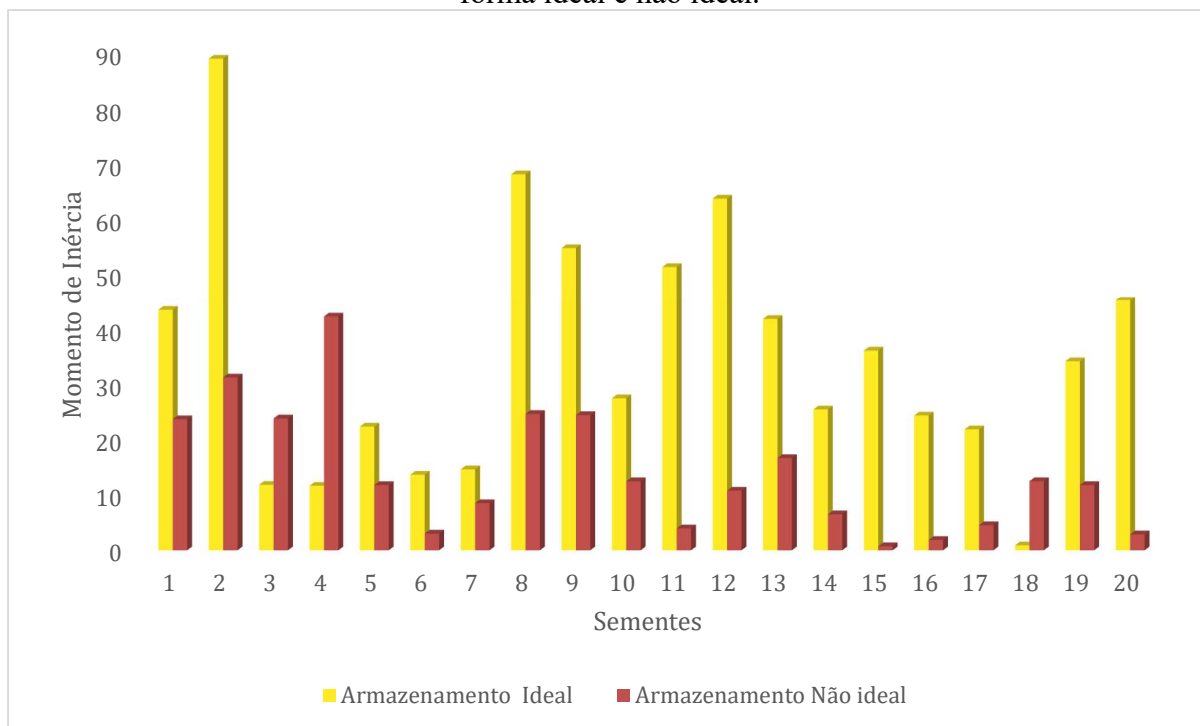
Os gráficos 3 e 4 mostram os dados de M.I. obtidos nos ensaios de BSL para sementes de soja e milho armazenado nas condições ideais e não ideais, respectivamente.

Gráfico 3. Momento de Inércia para sementes de soja que foram armazenadas de forma ideal e não ideal.



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Gráfico 4. Momento de Inércia para sementes de milho que foram armazenadas de forma ideal e não ideal.



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Os dados mostram que o valor médio de M.I. para as sementes de soja armazenadas adequadamente foi 28,62 enquanto para as sementes armazenadas de forma inadequada, esse valor caiu para 12,57. Já, para as sementes de milho, obteve-se um valor médio de M.I. de 35,13 para as que foram armazenadas em condições ideais, ao passo que as que foram armazenadas em condições não ideais teve um valor médio de M.I. de 13,91. Tais resultados são de extrema importância para a interpretação e comparação com teste de germinação feito de forma convencional.

Analisando os dados obtidos, a partir do gráfico 3, é possível observar que quando se armazenou as sementes de soja em condições ideais, obteve-se valores de M.I. maiores do que quando comparado com os índices obtidos das sementes de soja que foram armazenadas em condições não ideais de temperatura. O cenário observado para as sementes de soja se repete ao analisar os gráficos 4, contendo os índices obtidos para as sementes de milho, onde as sementes de milho que foram armazenadas em temperatura não ideal apresentam M.I. menores quando comparado com as sementes que foram armazenadas em temperatura ideal.

Assim, com os dados de M.I. determinados, foi possível fazer o Teste de Análise de Variância (ANOVA) para as sementes de soja (Tabela 1) e para as sementes de milho (Tabela 2).

Tabela 1. Teste de Análise de Variância para sementes de soja em condições de temperatura de armazenamento diferentes.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Desv. Padrão</i>	<i>Variância</i>
Armazenamento ideal	20	572,497704	28,6248852	17,354648	301,183825
Armazenamento não ideal	20	251,56919	12,5784595	8,833587	78,03226689

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2574,87777	1	2574,87777	13,5800027	0,0007099758312	4,09817173
Dentro dos grupos	7205,105	38	189,608046			
Total	9779,98352	39				

Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Tabela 2. Teste de Análise de Variância para sementes de milho em condições de temperatura de armazenamento diferentes.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Des. Padrão</i>	<i>Variância</i>
Armazenamento ideal	20	702,609919	35,13049595	22,295944	497,1091376
Armazenamento não ideal	20	278,351927	13,91759635	11,212589	125,722155

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4499,8710	1	4499,8710	14,449727	0,0005067991	4,098171731
Dentro dos grupos	11833,794	38	311,415646			
Total	16333,6656	39				

Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Baseado nos testes de ANOVA realizados para esse ensaio experimental para as sementes de soja, os índices adotados indicaram que houve diferença estatística significativa entre os índices de M.I. das sementes de soja que foram armazenadas de forma ideal e as que foram submetidas à condições não ideais de temperatura, já que o valor-P se apresentou menor que 0,05. Logo, nota-se que houve diferença significativa entre os dois grupos avaliados (Armazenamento ideal x Armazenamento não ideal) já que $F(1,38)=13,58$ e, $p=0,0007$, mostrando que de fato a condição de armazenamento impactou diretamente nos resultados obtidos de M.I. Além disso, os dados de M.I. entre sementes armazenadas adequadamente superaram em mais que o dobro o M.I. das sementes armazenadas de soja armazenada de forma inadequada, sendo seus valores medianos de 28,62 e 12,58, respectivamente. Ainda, ao utilizar dos valores de SQ entre os grupos e SQ total, é possível chegar ao valor do eta quadrado (η^2) de 0,263. Esse índice indicou um valor de efeito grande, ou seja, cerca de 26% da variação total nos valores das sementes pode ser atribuída ao efeito do tipo de armazenamento (temperatura ideal e não ideal).

Assim como para as sementes de milho, também foi possível observar através do teste de ANOVA que houve diferença estatística significativa entre os índices de M.I. das sementes de milho armazenadas em condições ideais de temperatura e as armazenadas em condições não ideais, visto que o valor-P obtido também é menor que 0,05. Dessa forma, chegou-se a um valor $F(1,38)=14,44$ e um valor- $p=0,0005$, mostrando que as sementes foram afetadas pela condição de temperatura de armazenamento. As sementes de milho armazenadas em condições ideais apresentaram uma média de 35,13, enquanto as sementes que foram armazenadas em condições não ideais tiveram a média de 13,92 de M.I., uma diferença de aproximadamente 21 unidades. Fora isso, ao calcular-se o eta quadrado, chegou-se a um valor de $\eta^2=0,275$, que, assim como para as sementes de soja, possui um efeito grande e indica que cerca de 27% da

variação total nos valores das sementes de milho pode ser atribuída ao efeito da condição de armazenagem.

Além disso, calculou-se o Desvio-Padrão (σ) para as sementes de soja e milho, armazenadas de forma ideal e não ideal. Para as sementes de soja armazenadas adequadamente chegou-se à $\sigma=17,35$, enquanto para as sementes de soja armazenadas de forma não ideal, chegou-se à $\sigma=8,83$, ou seja, apesar de estarem expostas ao armazenamento ideal, obteve-se valores menos uniforme para sementes de soja, entretanto, com médias maiores e, conseqüentemente, maior vigor, quando comparada com as sementes que foram armazenadas de forma não ideal. O mesmo se repete para as sementes de milho, onde as amostras armazenadas em condições ideais apresentaram $\sigma=22,29$ e, as armazenadas em condições não ideais apresentaram $\sigma=11,21$. Dessa forma, pode-se afirmar de maneira geral que, o armazenamento não ideal trouxe resultados mais uniformes, ao mesmo passo que esses valores uniformes resultam em uma média pior quando comparado com as sementes que foram armazenadas de forma ideal, tanto para soja, quanto para milho.

Logo, com esses resultados, foi possível verificar que tanto para as amostras de soja, quanto para as de milho, quando foram mantidas em condições ideais, apresentaram Momento de Inércia maior quando comparadas com as armazenadas em condições não ideais.

A próxima etapa da pesquisa consistiu em analisar o potencial germinativo das sementes com relação ao seu M.I. Dessa forma, as sementes de soja e milho, armazenadas em condições ideais e não ideais, foram levadas para teste de germinação seguindo a descrição deste trabalho. Após 7 dias, retirou-se as sementes da Incubadora BOD e realizou-se a análise das sementes que apresentaram germinação e não germinação. Os resultados do potencial germinativo das sementes de soja são apresentados na 3, ao passo que, a figura 4 corresponde ao potencial germinativo para as sementes de milho.

Figura 2. Ensaio de potencial germinativo para sementes de soja. a) armazenamento condições ideais; b) armazenamento em condições não ideais.



a)



b)

Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Figura 3. Ensaio de potencial germinativo para sementes de milho. a) armazenamento condições ideais; b) armazenamento em condições não ideais.



a)



b)

Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Como é possível observar na figura 3, as sementes de soja armazenadas em condições ideais apresentaram uma boa germinação, tendo apenas 1 das sementes que não emitiu as estruturas essenciais. Já, as sementes que não tiveram um armazenamento adequado, mostram uma germinação em menor quantidade (totalizando 9 sementes) e menor qualidade.

Assim como ocorreu na soja, as sementes de milho que foram armazenadas em condições ideais (figura 4.a) mostram-se com uma melhor germinação em quantidade e qualidade, onde apenas uma semente foi classificada como não germinada. Já, ao observar as sementes germinadas na figura 4.b, é possível ver que a qualidade e a quantidade de sementes de milho que foram armazenadas de forma não ideal são menores, onde dessas, 10 sementes não germinaram.

Visto que a temperatura e umidade relativa são pontos determinantes no processo de perda de viabilidade de sementes no processo de armazenamento (Marçal et. al., 2014) onde altas temperaturas são condições drásticas para a germinação de semente de milho e soja (Sbrussi et. al., 2014), e que sementes de milho e soja foram expostas a condições de temperatura estressantes, o teste de germinação mostra que de fato as sementes perderam vigor e qualidade de germinação, o que já era esperado para este trabalho como forma de estudo e o resultado de BSL corroborou para indicação da qualidade de sementes.

Diante desses resultados, foram feitas duas tabelas para comparação das amostras de soja e milho germinadas e não germinadas com o Momento de Inércia destas, a modo de verificar se foi possível ou não verificar essa perda de qualidade de germinação das sementes através do *BioSpeckle* laser. Os resultados dessa comparação encontram-se nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Momento de Inércia e condição de germinação para sementes de soja.

Amostras	Momento de Inércia	Condição	Amostras	Momento de Inércia	Condição
1	44,95	Germinada	21	31,92	Germinada
2	33,76	Germinada	22	26,42	Germinada
3	35,67	Germinada	23	37,95	Germinada
4	66,04	Germinada	24	29,82	Germinada
5	17,40	Germinada	25	27,35	Germinada

6	15,53	Germinada	26	19,88	Germinada
7	19,46	Germinada	27	18,33	Germinada
8	45,32	Germinada	28	16,18	Germinada
9	11,03	Germinada	29	13,56	Germinada
10	11,71	Germinada	30	13,76	Germinada
11	12,02	Germinada	31	12,98	Germinada
12	12,00	Germinada	32	2,83	Não germinada
13	13,20	Germinada	33	2,57	Não germinada
14	13,67	Germinada	34	1,59	Não germinada
15	14,01	Germinada	35	1,18	Não germinada
16	12,00	Germinada	36	5,49	Não germinada
17	11,05	Germinada	37	2,76	Não germinada
18	54,81	Germinada	38	3,80	Não germinada
19	49,20	Germinada	39	2,83	Não germinada
20	13,36	Germinada	40	0,81	Não germinada

Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Tabela 4. Momento de Inércia e condição de germinação para sementes de milho.

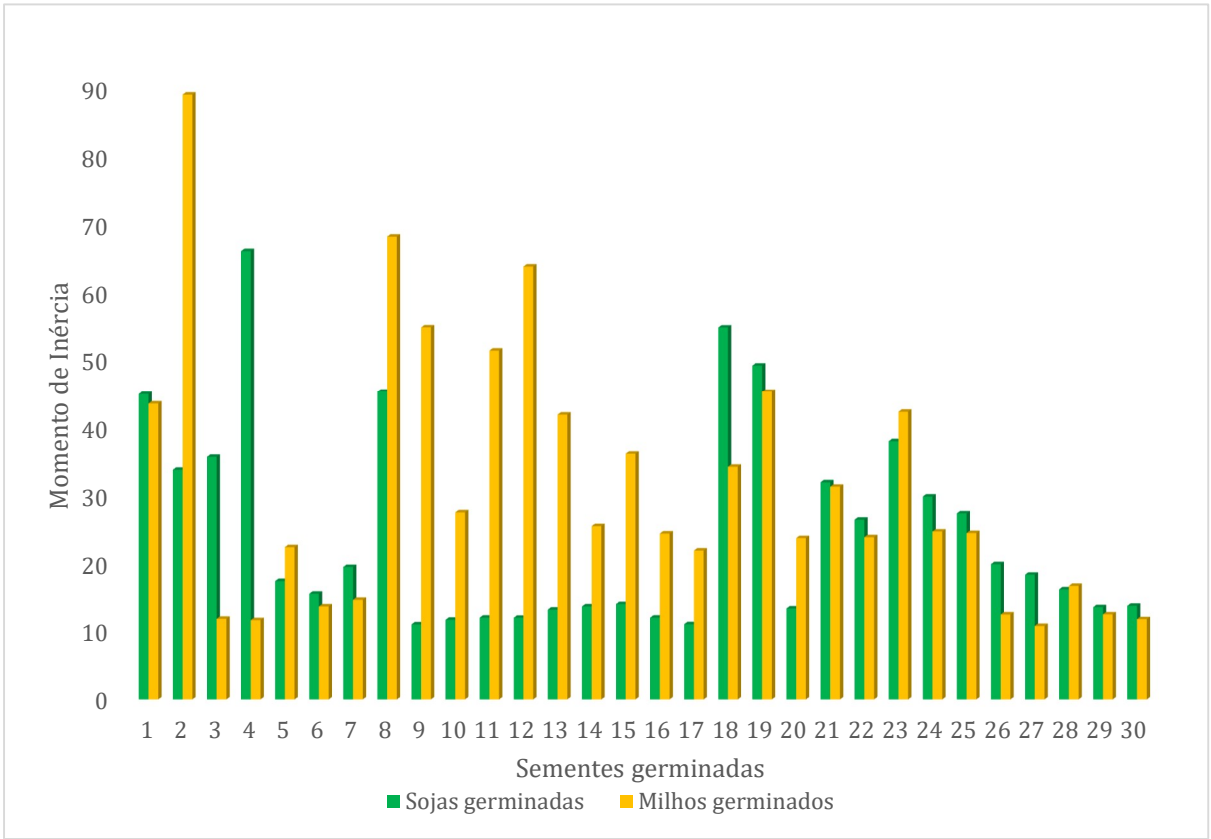
Amostras	Momento de Inércia	Condição	Amostras	Momento de Inércia	Condição
1	43,52	Germinada	21	31,26	Germinada
2	89,05	Germinada	22	23,84	Germinada
3	11,84	Germinada	23	42,29	Germinada
4	11,65	Germinada	24	24,67	Germinada
5	22,38	Germinada	25	24,45	Germinada
6	13,66	Germinada	26	12,48	Germinada
7	14,64	Germinada	27	10,79	Germinada
8	68,16	Germinada	28	16,68	Germinada
9	54,83	Germinada	29	12,49	Germinada
10	27,50	Germinada	30	11,79	Germinada
11	51,42	Germinada	31	0,89	Não germinada
12	63,78	Germinada	32	2,87	Não germinada
13	41,87	Germinada	33	3,02	Não germinada
14	25,47	Germinada	34	8,53	Não germinada
15	36,12	Germinada	35	3,95	Não germinada

16	24,38	Germinada	36	6,50	Não germinada
17	21,87	Germinada	37	0,72	Não germinada
18	34,20	Germinada	38	1,87	Não germinada
19	45,29	Germinada	39	4,53	Não germinada
20	23,71	Germinada	40	2,87	Não germinada

Fonte: Acervo pessoal, 2025.

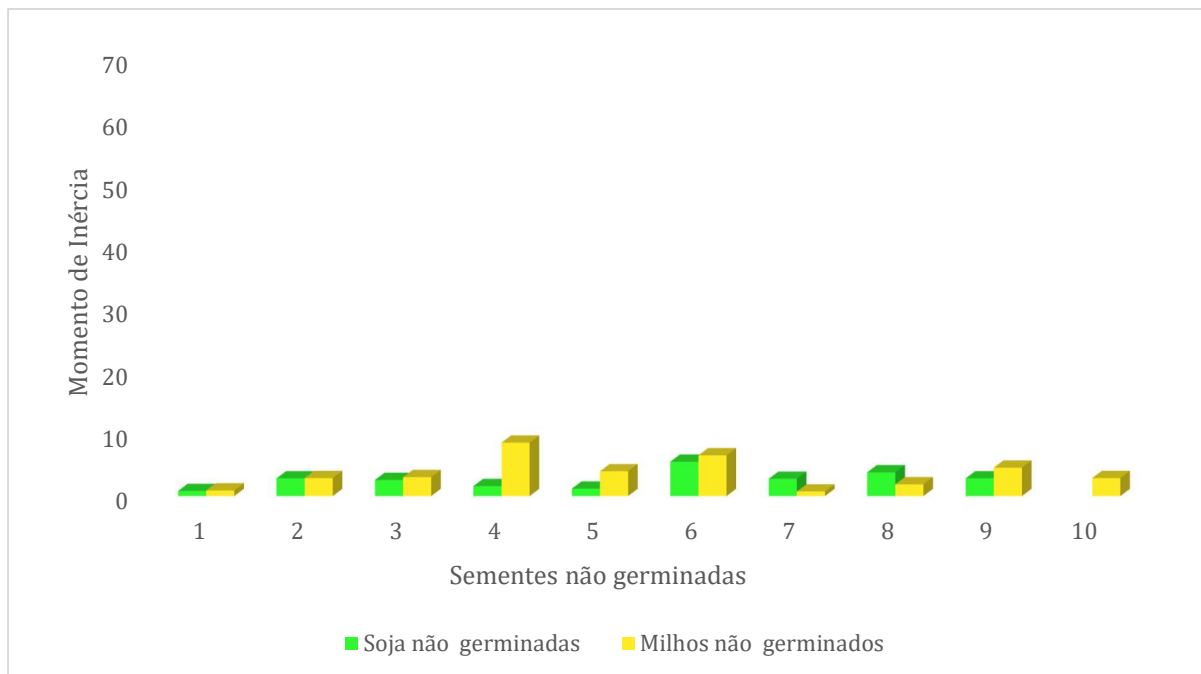
Para melhor visualização, esses dados foram utilizados na confecção dos gráficos 5 e 6, onde podemos observar as sementes germinadas e não germinadas com seus respectivos M.I.

Gráfico 5. Sementes de soja e milho que germinaram e seus respectivos momentos de Inércia.



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

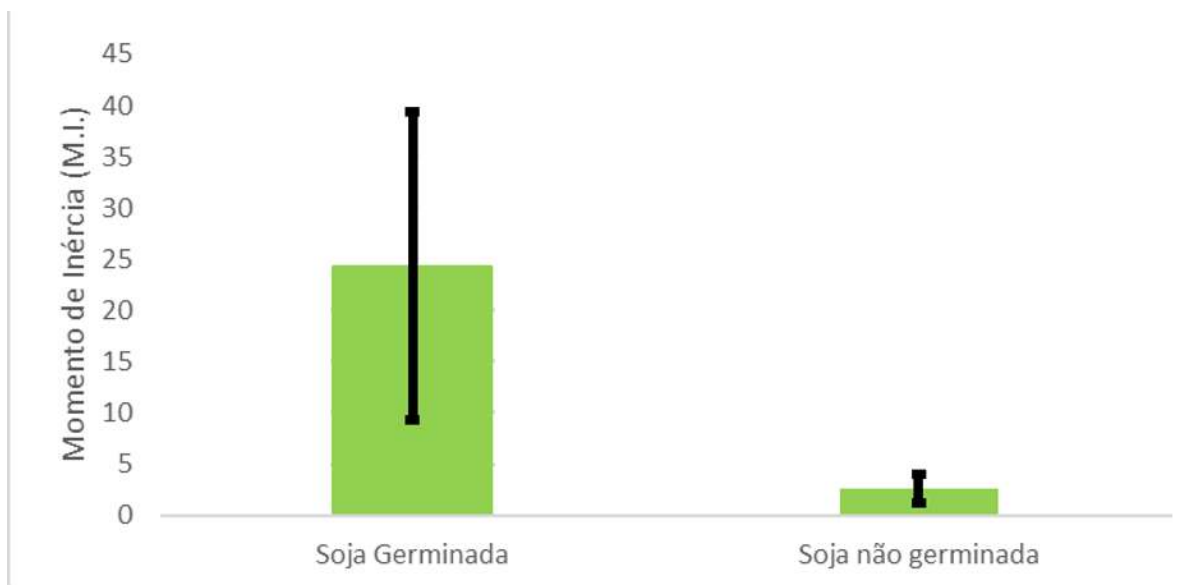
Gráfico 5. Sementes de soja e milho que não germinaram e seus respectivos momentos de Inércia.



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

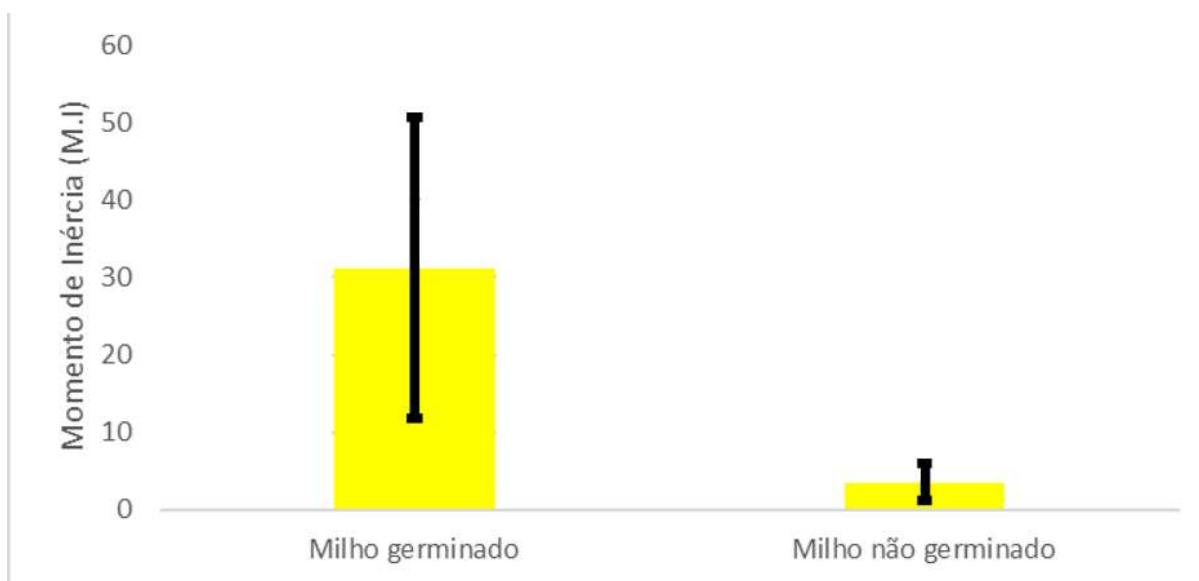
Diante dos resultados é possível fazer uma relação entre o M.I. e o potencial germinativo das sementes estudadas. As sementes de soja que não germinaram totalizam 9 amostras, enquanto as de milho somam 10 amostras. Entre essas, pode-se dizer que todas as sementes não germinadas, tanto de soja, quanto de milho, tiveram um Momento de Inércia considerado baixo, onde os índices variam entre 0 e 9. Por outro lado, as sementes que germinaram e somam uma quantidade maior de amostras, apresentam M.I. maior que as sementes que não germinaram, onde o índice apresenta variação entre 11 e 90. Dessa forma, elaborou-se o gráfico 7 e 8, envolvendo os valores médios de M.I. e o Desvio Padrão, para melhor visualização.

Gráfico 4. Média e Desvio Padrão obtidos a partir do M.I. de sementes de soja, germinadas e não germinadas.



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Gráfico 5. Média e Desvio Padrão obtidos a partir do M.I. de sementes de milho, germinadas e não germinadas.



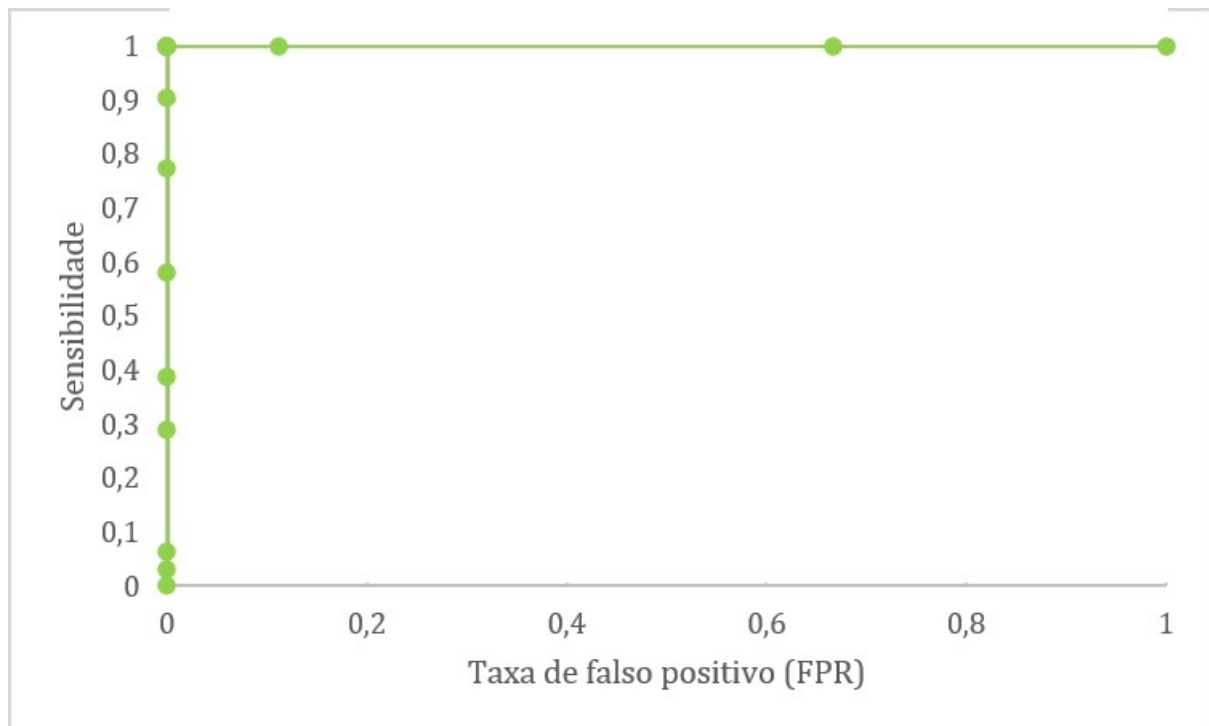
Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Sendo assim, a média do M.I. de sementes de soja que germinaram corresponde a 24,33 e a média de M.I. de sementes de soja que não germinaram corresponde a 2,65. Para as sementes de milho, a média do M.I. das sementes que germinaram corresponde a 31,20 enquanto, a média de M.I. das que não germinaram corresponde a 3,58. Fora isso, o Desvio Padrão (D.P.) calculado também se mostra menor para as sementes que não germinaram, correspondendo a um valor de 15,06 para as sojas germinadas e 19,35 para as sementes de

milho germinado, já para as sementes de soja que não germinaram chegou-se a um valor de D.P. 1,41 e 2,44 para as sementes de milho que não germinaram.

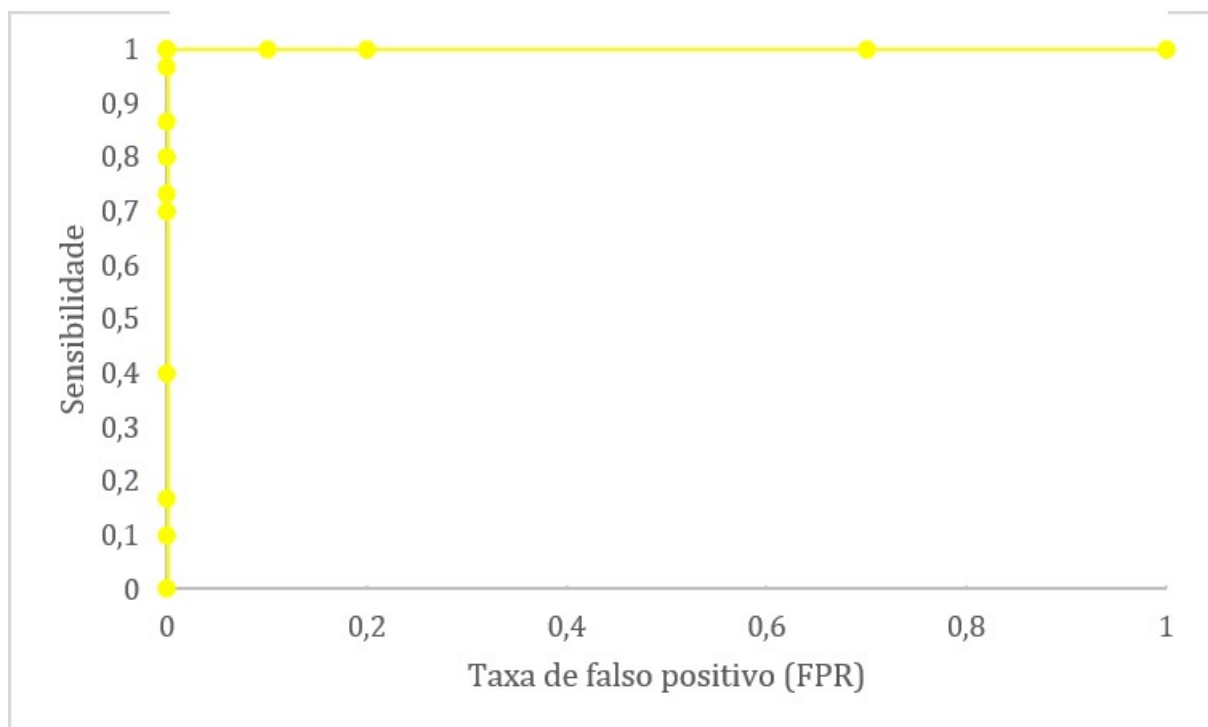
Com esses resultados e no intuito de complementar essa comparação entre os valores médios de Momento de Inércia, plotou-se curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) tanto para as sementes de soja, quanto para as sementes de milho, permitindo uma análise da capacidade discriminativa do Momento de Inércia. Em ambas as culturas, as curvas permaneceram agrupadas perto do canto superior esquerdo do gráfico, o que indica alta sensibilidade combinada com baixa taxa de falso-positivo e, conseqüentemente, mostrando o quão bem o M.I. obtido através do *BioSpeckle* separou as sementes germinadas e não germinadas.

Gráfico 6. Curva ROC do Momento de Inércia para discriminação entre sementes de soja germinadas e não germinadas



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Gráfico 7. Curva ROC do Momento de Inércia para discriminação entre sementes de milho germinadas e não germinadas.



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Nas sementes de soja observou-se que os valores de Momento de Inércia das sementes não germinadas permaneceram abaixo dos valores observados para as sementes germinadas, sem sobreposição entre as classes analisadas. Comportamento semelhante foi verificado para o milho, no qual também se observou separação entre sementes germinadas e não germinadas com base nos índices de MI. Tais efeitos já foram mencionados ao analisar os valores de Momento de Inércia e os resultados do teste de germinação. Assim, esse resultado explica o formato das curvas ROC obtidas e reforça que o Momento de Inércia apresentou elevado potencial para discriminar sementes com baixo e alto potencial germinativo.

Segundo um estudo conduzido por Braga et. al. 2003, onde buscou avaliar a viabilidade de sementes, chegou em resultados que apontam que quanto menor a viabilidade de uma semente, menores são os resultados quantitativos de M.I. e, quanto maior a viabilidade das sementes, maiores são os índices de Momento de Inércia, visto que há uma atividade maior sendo analisada. Esse mesmo conceito foi observado por um trabalho dirigido por Fracarolli et al., 2011, onde buscou-se avaliar o potencial germinativo de sementes de ipê-roxo através da técnica de *BioSpeckle*, sendo que as sementes que germinaram apresentaram valores Momento de Inércia maiores e, as sementes que não germinaram, apresentaram valores de M.I. menores.

Partindo desse pressuposto, as sementes de soja e de milho armazenadas em condições ideais apresentaram valores de Momento de Inércia maiores, ao mesmo passo que essas correspondem a sementes que germinaram com maior qualidade. Em contrapartida, o contrário é notório em sementes de soja e milho que foram mantidas em condições não ideais de temperatura, onde essas apresentam uma menor taxa de germinação e, entre as que germinaram, é possível verificar diferença significativa na qualidade de germinação quando comparadas com as sementes que foram mantidas em condições ideais de armazenamento e germinaram, ou seja, além da quantidade de sementes germinadas ser menor, o vigor e a qualidade de germinação também foi afetada por condições não ideais de temperatura e isso foi observado através de índices de Momento de Inércia menores, mostrando assim uma relação entre menores valores de Momento de Inércia e a menor taxa e qualidade de germinação das sementes de soja e milho. Tal feito pode então ser comparado com o valor médio de M.I. das sementes, sendo que esse valor médio é menor para as sementes que foram armazenadas em condições não ideais.

Como já comentado, entre as sementes que germinaram também cabe a análise da qualidade dessa germinação. Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), para avaliação do processo de germinação deve-se observar as estruturas essenciais, como o sistema radicular e/ou parte aérea. Diante disso, plântulas normais são consideradas

aquelas a qual se enquadram como plântulas intactas, apresentando essas estruturas essenciais bem desenvolvidas, completas e sadias. Nesse contexto, tanto para as sementes de soja, quanto para as sementes de milho, quando armazenadas em condições não ideais, a germinação se mostrou com menor qualidade, havendo plântulas danificadas (com estruturas essenciais ausentes ou danificadas) ou plântulas deformadas (com desenvolvimento fraco, com distúrbios fisiológicos ou estruturas essenciais deformadas) (MAPA, 2009). Seguindo desse pressuposto, as mesmas sementes mantidas em condições não ideais quando germinadas, apresentaram média de índices de Momento de Inércia menores quando comparado com os índices numéricos das sementes que foram armazenadas em condições ideais, demonstrando assim que a técnica de *BioSpeckle* foi capaz de captar essa diferença, uma vez que a atividade celular deve estar bem menor, pois a qualidade de germinação no papel germitest se mostrou menor, refletindo então no Momento de Inércia calculado.

Além disso, a umidade das sementes utilizadas em teste com *Biospeckle* é de suma importância e pode impactar diretamente no Momento de Inércia a ser obtido. Como aplicou-se uma condição de armazenamento buscando diminuir o vigor das sementes de soja e milho através da temperatura, a umidade destas sementes pode ter variado bastante, resultando em variações no Momento de Inércia calculado, sendo que o mesmo pode ter ocorrido entre as variações obtidas nas sementes que foram armazenadas em condições ideais de temperatura, explicando assim, parte da variação nos números de M.I.

6. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos é possível afirmar que o presente trabalho demonstrou que a técnica de BSL foi eficaz ao diferenciar sementes viáveis e inviáveis, tanto para soja, quanto para milho, sendo uma alternativa promissora frente aos métodos tradicionais, por permitir rapidez, precisão e preservação das amostras. Diante disso, a temperatura de armazenamento de sementes de soja e milho foi essencial para garantir a qualidade de germinação, visto que a análise estatística confirmou diferença significativa entre os grupos envolvendo o armazenamento ideal e não ideal e, através do teste de germinação com papel germitest essas diferenças foram comprovadas. Diante disso, o *BioSpeckle* laser (BSL) mostrou-se capaz de identificar variações entre as sementes armazenadas de forma ideal e não ideal de uma forma não destrutiva, já que não influenciou na capacidade de germinação dessas sementes. Ainda, notou-se que as sementes que obtiveram Momento de Inércia (M.I) muito inferiores correspondem às sementes que não germinaram e que foram submetidas ao armazenamento

não ideal, reforçando a correlação entre a maior atividade biológica e maior capacidade germinativa com os valores de M.I. maiores.

Sendo assim, a continuidade de estudos que explorem essa técnica com maior número de sementes e diferentes condições de estresse, pode permitir e consolidar sua aplicação em larga escala no setor agrícola, tanto relacionado a capacidade da semente em germinar ou não germinar, quanto na qualidade de germinação, contribuindo para a produção de sementes de alta qualidade e para o avanço de tecnologias de sementes no Brasil.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F. M. S., & Spolador, H. F. S. (2024). Determinantes da produtividade total dos fatores da lavoura de milho no Brasil: uma análise de fronteira estocástica para o período de 1995 a 2017. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62(4), e287305. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.287305>.

BIGOLIN, Gabriele; DE CONTI, André Felipe; BENNEDETTI, Rodrigo Postai; HARTER, Letícia dos Santos Holbig. Influência do vigor de sementes no rendimento e qualidade fisiológica de sementes de soja. *Enciclopédia Biosfera*, Jandaia-GO, v. 19, n. 40, p. 14-22, 2022. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250193370>.

BRAGA, Roberto Alves Júnior; et al. *A Practical Guide to Biospeckle Laser Analysis: Theory and Software*. Lavras: Editora UFLA, 2016. pp 57-66, 2016.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, Acompanhamento de safras brasileiras. Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/8o-levantamento-safra-2025-26/8o-levantamento-safra-2025-26>.

ENES, Adilson Machado. Análise de frequência do biospeckle laser aplicada ao mapeamento de fenômenos em sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).2011. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1615188>. Acesso em: 20.Set.2024.

ENES, Adilson Machado; et al. DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA ANÁLISE DE BIOSPECKLE LASER. In: *Engenharia: a máquina que constrói o futuro*. 11a. ed. Piracanjuba: Conhecimento, 2022, v.1, p. 6-12.

FLORIANO, Natali Gabriela; et al. A IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA NO ARMAZENAMENTO DE SEMENTES DE SOJA. 2022. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/51846/1/Natali+Gabriela+Floriano+-+Defesa.pdf>. Acesso em 08.jun.2025.

FONTES, Amanda Vilaça. *Processo de industrialização da soja no Brasil*. 2019. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de

Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em:
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/28362>.

FRACAROLLI, Juliana Aparecida. UTILIZAÇÃO DO BIOSPECKLE LASER NA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL GERMINATIVO DE SEMENTES DE IPÊ-ROXO (*Tabebuia heptaphylla* (Vellozo) Toledo). 2011. Disponível em:
<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/791521>. Acesso em: 22.Ago.2025.

HERBELE, Elaine; et al. Qualidade fisiológica e atividade enzimática de sementes de milho durante o armazenamento. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.19084/rca.17283>. Acesso em: 08.Ago.2025.

NASCIMENTO, Álvaro Leonardo; et al. Desenvolvimento de um modelo para o Biospeckle na análise de sementes do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). 2005. In: Scielo. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/W4pqKy4zCgZdmxqQxXN83FB/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10.Set.2024.

OLIVEIRA NETO, Eduardo Macedo de. Efeito de fungicidas no tratamento de sementes de milho sobre *Penicillium* Spp. E *Fusarium verticillioides*. 2023. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/38887>.

RABELO, G. F.; ENES, A. M.; BRAGA, R. A. Jr.; FABBRO, I. M. D. Frequency response of biospeckle laser images of bean seeds contaminated by fungi,. *Biosystem Engineering*, v. 110, n. 3, pp. 297-301, 2011.

RABELO, Giovanni Francisco; et al. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. 2000. In: SciELO. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/ZZFVNpdYxtXSvTy39rRNbfj/?lang=en>. Acesso em: 10.Ago.2025.

RAMOS, Caroline Marques; PIZAIA, Marcia Gonçalves; CALDARELLI, Carlos Eduardo; CAMARA, Marcia Regina Gabardo da. Competitividade e inserção da soja brasileira no

mercado internacional. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 43, n. especial, p. 61-70, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.19084/rca.19022>.

REIS, Venicius Urbano Vilela. Vigor de sementes de milho e o estabelecimento de estande, desenvolvimento e produtividade. Universidade Federal de Lavras. 2021. Disponível em: https://sip.prg.ufla.br/arquivos/php/bibliotecas/repositorio/download_documento/baixar_por_anosemestre_matricula.php?arquivo=20211_201710652.

SBRUSSI, Cesar Augusto Gasparetto; et al. Germinação de sementes de milho com diferentes níveis de vigor em resposta à diferentes temperaturas. 2014. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/13850>. Acesso em 06.Ago.2025.

SILVA, Edvan Costa; et al. TESTE DE GERMINAÇÃO EM SEMENTES DE MILHO COMERCIAL NA REGIÃO DE IMPERATRIZ – MA. 2016. Disponível em: <https://ojs.unesp.br/index.php/rculturaagronomica/article/view/2446-8355.2016v25n4p441-446>. Acesso em 12.Jun.2025.

SILVA, Emerson Rodrigo. Estudo das propriedades biospeckle e suas aplicações. 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-02102007-104941/pt-br.php>. Acesso em: 08.Jun.2025.

STRUKER, Stevan. Influência do vigor de sementes nos atributos de produtividade da soja. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. 2018. Disponível em: <https://pergamum.ufpel.edu.br/pergamumweb/vinculos/0000c3/0000c355.pdf>.

SUTTON, D. B.; PUNJ, Z. K. Investigating biospeckle laser analysis as a diagnostic method to assess sprouting damage in wheat seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 141, pp. 238-247, 2017.

VICENTINI, G. Protótipo portátil para analisar sementes por biospeckle laser: validação e desenvolvimento. 2023. 43 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/handle/1/55860>.