

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Secagem, modelagem matemática, potencial de armazenamento e anatomia do
tegumento de sementes de soja '55I57 RSF'**

Samuel Gonçalves Ferreira dos Santos
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

SAMUEL GONÇALVES FERREIRA DOS SANTOS

Secagem, modelagem matemática, potencial de armazenamento e anatomia do tegumento de sementes de soja '55I57 RSF'

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Eduardo Fontes Araujo

Coorientadores: Laercio Junio da Silva
Roberto Fontes Araújo

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237s
2026

Santos, Samuel Gonçalves Ferreira dos, 1997-
Secagem, modelagem matemática, potencial de
armazenamento e anatomia do tegumento de sementes de soja
'55I57 RSF' / Samuel Gonçalves Ferreira dos Santos. – Viçosa,
MG, 2026.

1 tese eletrônica (82 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Eduardo Fontes Araujo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.505>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Semente - Secagem - Modelos matemáticos.
2. Sementes - Qualidade. 3. Sementes - Armazenamento.
I. Araujo, Eduardo Fontes, 1957-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 633.3421

SAMUEL GONÇALVES FERREIRA DOS SANTOS

Secagem, modelagem matemática, potencial de armazenamento e anatomia do tegumento de sementes de soja '55I57 RSF'

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de agosto de 2026.

Assentimento:

Samuel Gonçalves Ferreira dos Santos
Autor

Eduardo Fontes Araujo
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 02/09/2026 às 13:33:36 e pelo orientador em 02/09/2026 às 14:21:39. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **B83P.7UVS.XO9V** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por Seu amor, Seu amparo e pelas bênçãos concedidas ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, Silvano Ferreira dos Santos e Kênia Aparecida Gonçalves Pires, pela educação recebida por meio de bons exemplos e valores que levarei comigo por toda a vida.

À minha noiva, Isadora Xavier, pelo apoio e pelo incentivo ao longo desta jornada e por estar comigo nos momentos difíceis.

À minha tia, Cleidia Maria Pires, pelos incentivos e pelas palavras positivas ao longo de toda a minha jornada de pós-graduação.

Às minhas irmãs, Andressa e Samira, pelo apoio e por acreditarem na minha capacidade, e a todos os familiares que sempre estiveram ao meu lado.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, por contribuírem para a minha formação profissional e pela oportunidade.

Ao professor, pesquisador e orientador, Dr. Eduardo Fontes Araujo, pela orientação, amizade, ensinamentos, oportunidades e pela confiança em mim depositada ao longo de seis anos de caminhada acadêmica, marcada por respeito e aprendizado.

Ao coorientador, Dr. Roberto Fontes Araujo, pela parceria e coorientação desde o mestrado, pelo apoio em outros projetos e pela importante contribuição para a minha formação acadêmica.

Ao coorientador, Dr. Laércio Junio da Silva, pelas sugestões, pela disponibilidade e pelo suporte durante a realização deste trabalho.

À professora e pesquisadora Dra. Denise Cunha Fernandes S. Dias, pelas excelentes aulas, pelos ensinamentos, pela confiança depositada e pela disponibilidade sempre que precisei.

Aos amigos do Grupo de Estudos em Sementes (GSem), por todo o suporte durante o mestrado e o doutorado.

Aos técnicos do Laboratório de Sementes, em especial ao Wander Douglas Pereira, por todo o suporte durante a condução dos meus experimentos.

Aos técnicos e terceirizados da UEPE Horta Nova, em especial ao Adriano, por todo o suporte durante a condução dos campos de produção de sementes.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de

Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

SANTOS, Samuel Gonçalves Ferreira dos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2026. **Secagem, modelagem matemática, potencial de armazenamento e anatomia do tegumento de sementes de soja '55I57 RSF'**. Orientador: Eduardo Fontes Araujo. Coorientadores: Laercio Junio da Silva e Roberto Fontes Araújo.

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) ocupa posição de destaque no Brasil e no mundo pelo volume produzido e pelo potencial papel econômico que exerce ao abastecer cadeias de óleo vegetal, farelo proteico para alimentação animal, ingredientes para alimentos humanos e insumos para biodiesel e outros bioprodutos. Nesse cenário, no Brasil, a cultivar '55I57 RSF' tem ampla adoção na Região Sul por apresentar alto potencial produtivo, mas relatos de maior sensibilidade a danos de colheita e pós-colheita tornam a preservação da qualidade de suas sementes desafiadora. A secagem surge, assim, como etapa crítica pós-colheita, pois a velocidade de remoção de água determina a preservação da qualidade fisiológica das sementes, influenciando a integridade de membranas, a atividade respiratória e a suscetibilidade a processos oxidativos durante o armazenamento. Entre os elementos estruturais das sementes que conferem proteção, destaca-se o tegumento, cuja arquitetura (grau de lignificação e microestrutura) regula a permeabilidade, a resistência a fissuras térmicas e a propensão a danos mecânicos, funcionando como primeira barreira contra estresses físicos e térmicos. Diante da relevância da '55I57 RSF', torna-se essencial estabelecer protocolos específicos de secagem, bem como ajustar modelos matemáticos que descrevam esse processo, a fim de garantir a preservação da qualidade fisiológica das sementes. O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos da secagem contínua e intermitente no potencial de armazenamento de sementes de soja '55I57 RSF' e nos aspectos anatômicos do tegumento após a secagem, bem como ajustar e comparar modelos de cinética de secagem para descrever as curvas, estimar tempos de processo e apoiar a definição de janelas operacionais. Para isso, sementes colhidas na safra 2023/24, com aproximadamente 19% de teor de água, foram submetidas à secagem contínua e intermitente nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C em estufa de circulação de ar. Após a secagem, as sementes foram armazenadas em câmara fria ($12,9 \pm 1,7$ °C e $61,2 \pm 4,8\%$ UR) e avaliadas quanto à qualidade fisiológica imediatamente (tempo zero) e aos 3, 6 e 9 meses de armazenamento. A qualidade fisiológica das sementes foi avaliada por meio dos testes de germinação, primeira contagem de germinação, emergência em canteiro, envelhecimento acelerado e condutividade elétrica. O tegumento foi caracterizado quanto

ao teor de lignina, à espessura (microscopia de luz) e às características da superfície externa (microscopia eletrônica de varredura). Complementarmente, sete modelos matemáticos foram ajustados às curvas de secagem por regressão não linear (Gauss–Newton), com intuito de estimar o tempo de secagem em futuros trabalhos e melhor definir janelas operacionais. O melhor modelo foi escolhido com base no coeficiente de determinação (R^2), no erro médio relativo (P), no erro médio estimado (SE), na distribuição de resíduos e pelos critérios AIC/BIC. Os resultados indicaram que a secagem contínua a 35 °C preserva o vigor inicial das sementes e mantém sua qualidade ao longo do armazenamento, ao passo que, a 44 °C, ocorrem perdas fisiológicas e fissuras superficiais no tegumento. A secagem intermitente, sobretudo em temperaturas mais baixas, mostrou-se prejudicial ao vigor das sementes. Em relação à anatomia, não se observaram alterações mensuráveis na espessura ou na organização interna do tegumento atribuíveis aos métodos de secagem. Em termos de modelagem, o modelo de Page foi o que melhor descreveu as curvas de secagem e pode ser empregado para prever tempos de processo, dimensionar e aperfeiçoar secadores e delimitar janelas operacionais em função do teor-alvo de água.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Merrill ; Vigor ; Temperatura de secagem; Armazenabilidade; Modelos matemáticos

ABSTRACT

SANTOS, Samuel Gonçalves Ferreira dos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2026. **Drying, mathematical modeling, storage potential, and seed coat anatomy of soybean seeds '55I57 RSF'**. Adviser: Eduardo Fontes Araujo. Co-advisers: Laercio Junio da Silva and Roberto Fontes Araújo.

Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) occupies a prominent position in Brazil and worldwide due to its production volume and the potential economic role it plays in supplying chains of vegetable oil, protein meal for animal feed, ingredients for human food, and raw materials for biodiesel and other bioproducts. In this scenario, in Brazil, the cultivar '55I57 RSF' has wide adoption in the South Region because of its high yield potential; however, reports of greater sensitivity to harvest and postharvest damage make the preservation of its seed quality challenging. Drying therefore emerges as a critical postharvest step, since the rate of water removal determines the preservation of seed physiological quality, influencing membrane integrity, respiratory activity, and susceptibility to oxidative processes during storage. Among the structural elements of seeds that provide protection, the seed coat stands out, whose architecture, degree of lignification, and microstructure regulate permeability, resistance to thermal fissures, and susceptibility to mechanical damage, functioning as the first barrier against physical and thermal stresses. Given the relevance of '55I57 RSF', it is essential to establish specific drying protocols, as well as to fit mathematical models that describe this process, in order to ensure the preservation of seed physiological quality. The objective of this study was to investigate the effects of continuous and intermittent drying on the storage potential of '55I57 RSF' soybean seeds and on seed coat anatomical aspects after drying, as well as to fit and compare drying kinetics models to describe the curves, estimate process times, and support the definition of operational windows. For this purpose, seeds harvested in the 2023/24 growing season, with approximately 19% moisture content, were subjected to continuous and intermittent drying at temperatures of 35, 38, 41, and 44 °C in a forced-air circulation oven. After drying, the seeds were stored in a cold chamber (12.9 ± 1.7 °C and $61.2 \pm 4.8\%$ RH) and evaluated for physiological quality immediately after drying (time zero) and after 3, 6, and 9 months of storage. Seed physiological quality was evaluated by germination, first germination count, seedling emergence in seedbed, accelerated aging, and electrical conductivity tests. The seed coat was characterized for lignin content, thickness by light microscopy, and external surface characteristics by scanning electron microscopy. Complementarily, seven mathematical

models were fitted to the drying curves by nonlinear regression using the Gauss–Newton method, with the aim of estimating drying time in future studies and better defining operational windows. The best model was selected based on the coefficient of determination (R^2), mean relative error (P), estimated mean error (SE), residual distribution, and AIC/BIC criteria. The results indicated that continuous drying at 35 °C preserves the initial vigor of the seeds and maintains their quality during storage, whereas at 44 °C physiological losses and superficial fissures in the seed coat occur. Intermittent drying, especially at lower temperatures, was detrimental to seed vigor. Regarding anatomy, no measurable changes were observed in seed coat thickness or internal organization attributable to the drying methods. In terms of modeling, the Page model best described the drying curves and can be used to predict process times, design and improve dryers, and define operational windows according to the target moisture content.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill ; Vigor ; Drying temperature ; Storability ; Mathematical models

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	5
ABSTRACT	7
INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO 1	14
MÉTODOS DE SECAGEM NA ANATOMIA DO TEGUMENTO E NA ARMAZENABILIDADE DE SEMENTES DE SOJA ‘55I57 RSF’	15
RESUMO	15
ABSTRACT	17
INTRODUÇÃO.....	18
MATERIAL E MÉTODOS.....	19
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS	48
CAPÍTULO 2	55
CINÉTICA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE SEMENTES DE SOJA ‘55I57 RSF’	56
RESUMO	56
ABSTRACT	57
1. INTRODUÇÃO.....	58
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
2.1 Determinação experimental da cinética de secagem	59
2.2 Ajuste dos modelos.....	60
2.3 Seleção do melhor modelo	61
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1 Determinação experimental da cinética de secagem	64
3.2 Seleção do melhor modelo	66
3.3 Aplicação do modelo em cenário de UBS (exemplo prático)	75
CONCLUSÃO.....	78
CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS	80

INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma oleaginosa originária da China, pertencente à família Fabaceae, e figura entre as culturas de maior importância econômica mundial. Na safra 2024/25, a produção brasileira de soja alcançou o recorde de aproximadamente 171,5 milhões de toneladas. A região Centro-Oeste concentrou a maior produção, seguida pela região Sul, com aproximadamente 86,6 e 39,8 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2025).

A soja é propagada por sementes, cuja qualidade resulta da combinação de atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que determinam o estabelecimento e o desenvolvimento das plantas a campo. No atributo genético, cada cultivar reúne um conjunto próprio de características (ciclo, vigor, tolerância a estresses, resistência a pragas e doenças) que implica ajustes de manejo ao longo da cadeia produtiva — da implantação à colheita, secagem e armazenamento. Até 2026, havia no Brasil mais de 2.900 registros de genótipos de soja, evidenciando o avanço do melhoramento genético e a diversidade de materiais disponíveis (BRASIL, 2026).

Dentre os genótipos cultivados no país, especialmente na região Sul, destaca-se a cultivar 55I57 RSF IPRO (Zeus). Essa cultivar pertence ao grupo de maturação 5.5, apresenta ciclo indeterminado e porte médio, e incorpora a tecnologia Intacta RR2 PRO®, que combina tolerância ao herbicida glifosato com proteção contra lagartas em um único produto. Com elevado peso de mil sementes, podendo ultrapassar 209 g, é recomendada para os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina (BRASMAX, 2024). Em condições ideais de cultivo, a cultivar ‘55I57 RSF’ tem apresentado elevados patamares de produtividade. ARAÚJO *et al.* (2024) relataram peso de mil sementes de 215,7 g, valor muito superior ao de outros materiais avaliados no mesmo estudo. Resultados semelhantes foram descritos por SILVA & SIMONETTI (2024), com peso de mil sementes de 204,5 g e produtividade de 4.666,6 kg ha⁻¹.

Por outro lado, diversos autores apontam que a 55I57 RSF pode apresentar desafios quanto à germinação e ao vigor de suas sementes (COPPO *et al.*, 2022; PANISSON *et al.*, 2022; TONI *et al.*, 2024), especialmente quando produzidas sob condições subótimas. Esse comportamento tem sido associado à espessura e ao teor de lignina do tegumento, possivelmente inferiores aos de outras cultivares do mercado, o que aumenta a vulnerabilidade a danos tanto no campo quanto na colheita e durante o beneficiamento. Ressalta-se que o tegumento exerce função essencial na proteção da semente contra danos e estresses (MARCOS-

FILHO, 2015), influenciando diretamente a germinação e o vigor (RADCHUK & BORISJUK, 2014).

Ao longo do sistema de produção, múltiplos fatores influenciam a qualidade final das sementes, incluindo condições ambientais, controle de pragas e doenças, ponto de colheita, beneficiamento, secagem, armazenamento e tratamento de sementes (SANTOS *et al.*, 2024; VERGARA *et al.*, 2019; TONI *et al.*, 2024). Nesse contexto, a secagem é etapa fundamental para preservar a qualidade, ao remover o excedente de água, reduzindo a atividade biológica e garantindo a qualidade fisiológica. Quando realizada de forma inadequada, a secagem pode provocar alterações fisiológicas adversas, como modificações na atividade enzimática, desnaturação proteica e danos celulares, com impactos negativos sobre a germinação (ROSA *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2024).

De modo geral, o processamento pós-colheita de sementes de soja está bem estabelecido, com recomendações de secagem de até 43 °C na massa de sementes para o método intermitente e até 38 °C para o método estacionário/contínuo (PESKE *et al.*, 2012; GOMES *et al.*, 2023). Todavia, diante da maior sensibilidade atribuída à cultivar 55I57 RSF, estudos específicos são necessários para definir a metodologia de secagem mais apropriada para esse genótipo.

A modelagem das curvas de secagem constitui ferramenta essencial para descrever a dinâmica de remoção de água e otimizar o processo. Modelos matemáticos como Newton, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page têm sido amplamente empregados para prever o comportamento de curvas de secagem em diferentes espécies e materiais, a exemplo de soja (OLIVEIRA *et al.*, 2014), amendoim (MABASSO *et al.*, 2025), girassol (NASCIMENTO *et al.*, 2018) e quinoa (KHAN *et al.*, 2025). O uso de modelos bem ajustados permite identificar condições operacionais mais adequadas, reduzir custos e aumentar a eficiência do processamento. Dessa forma, é possível estimar o tempo de secagem e, por consequência, o consumo energético, elementos que determinam o custo do processo (SIQUEIRA *et al.*, 2020).

Desta forma, o objetivo deste estudo foi investigar os efeitos da secagem contínua e intermitente no potencial de armazenamento de sementes de soja ‘55I57 RSF’ e nos aspectos anatômicos do tegumento após a secagem, bem como ajustar e comparar modelos de cinética de secagem para descrever as curvas, estimar tempos de processo e apoiar a definição de janelas operacionais.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, T. G.; HARMS, K. L.; WAURECK, A. Influence of seeding density on agronomic characteristics and productivity of soybean cultivars. **Revista Scientia Rural**, v. 28, n. 1, p. 23-35, 2024.
- BRASIL. **Registro Nacional de Cultivares – RNC**. Brasília, 2026. Disponível em: <https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php>. Acesso em: 23 ago. 2026.
- BRASMAX. **Brasmax Zeus IPRO: o poder do máximo rendimento de soja**. 2024. Disponível em: <https://www.brasmaxgenetica.com.br/blog/brasmax-zeus/>. Acesso em: 06 jul. 2024.
- CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos. Brasília, Safra 2024/25 – Décimo segundo levantamento**, p. 1-133, set. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/12o-levantamento-safra-2024-25>>. Acesso em: 23 ago. 2026.
- COPPO, C.; BRACCINI, A. L.; HENNING, F. A.; PEREIRA, R.; SILVA, B. G.; OLIVEIRA, S. M.; SANTOS, R. F.; BASTIANI, G. G.; CATELAN, L. C.; PROTZEK, H. M. C.; BORGES, Y. M. Interaction of mechanical damage and chemical treatment and its effects on soybean seed physiological quality. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 10, p. 34-42, 2022.
- GOMES, L. J. C.; FARIAS, T.; CARVALHO, T. C.; WAURECK, A. Secagem estacionária e intermitente e sua influência na qualidade das sementes de soja. **Revista Scientia Rural**, v. 27, n. 1, p. 1-10, 2023.
- KHAN, J.; GUL, P.; LI, Q.; LIU, K. Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 117, p. 1-22, 2025.
- MABASSO, G. A.; RESENDE, O.; AMADE, F. F.; SIQUEIRA, V. C.; SOUZA, D. G. Drying kinetics and thermodynamic properties of peanut seeds (*Arachis hypogaea* L.). **Food Science and Technology**, v. 45, p. 1-9, 2025.
- MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015. 659p.
- NASCIMENTO, A. P. S.; BARROS, S. L.; SANTOS, N. C.; ARAÚJO, A. J. B.; CAVALCANTI, A. S. R. R. M.; DUARTE, M. E. M. Secagem convectiva e influência da temperatura nas propriedades físico-químicas das amêndoas de girassol comercial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 20, n. 3, p. 227-238, 2018.

- OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; BESSA, J. F. V.; KESTER, A. N.; SMANIOTTO, T. A.S. Mathematical modeling and thermodynamic properties for drying soybean grains. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 1, p. 31-38, 2014.
- PANISSON, A. C.; FELICIO T. P.; SPONCHIADO J. C.; XAVIER, K. L.; MANTOVANI, A. Qualidade fisiológica e sanitária de sementes comerciais e salvas de soja (*Glycine max.*) produzidas na região do meio oeste de Santa Catarina. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 6, p. 7-12, 2022.
- PESKE, S. T.; BARROS, A. C. S. A.; SCHUCH, L. O. B. Produção de sementes. In: PESKE, S.T.; VILLELA, F.A.; MENEGHELLO, G.E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3ª edição. Pelotas: Ed. Universitária, 2012, p. 13-100.
- RADCHUK, V.; BORISJUK, L. Physical, metabolic and developmental functions of the seed coat. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. 1 p. 1-17, 2014.
- ROSA, C. O.; SILVA, F. A.; CRUZ, D. R. C.; SANTOS, S. G. F. Importância da secagem e armazenamento adequados na manutenção da qualidade de sementes de pimenta (*Capsicum*). **Research, Society and Development**, v.12, p.1-14, 2023.
- SANTOS, S. G. F.; PAULA, D. F.; SOUZA, A. M. B.; SILVA, I. J.; COELHO, A. P. F.; SILVA, L. J.; DIAS, D. C. F. S.; ARAUJO, E. F. Drying kinetics and physiological quality of *Solanum aethiopicum* seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 11, p. 1-7, 2024.
- SILVA, A. S.; SIMONETTI, A. P. M. M. Avaliação de diferentes cultivares de soja no município de Braganey - PR. **Revista Cultivando o Saber**, v. 17, n. 1, p. 12-20, 2024.
- SIQUEIRA, V. C.; LEITE, R. A.; MABASSO, G. A.; MARTINS, E. A. S.; QUEQUETO, W. D.; ISQUIERDO, E. P. Drying kinetics and effective diffusion of buckwheat grains. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. 1-9, 2020.
- TONI, J. R.; RADUNZ, L. L.; GALON, L.; DIONELLO, R. G. Quality assessment of soybean seeds submitted to industrial seed treatment and stored in a natural and controlled environment. **Journal of Stored Products Research**, v. 108, p. 1-7, 2024.
- VERGARA, R.; SILVA, R. N. O.; NADAL, A. P.; GADOTTI, G. I.; AUMONDE, T. Z.; VILLELA, F. A. Harvest delay, storage and physiological quality of soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 4, p. 506-513, 2019.

CAPÍTULO 1

MÉTODOS DE SECAGEM NA ANATOMIA DO TEGUMENTO E NA ARMAZENABILIDADE DE SEMENTES DE SOJA ‘55I57 RSF’

MÉTODOS DE SECAGEM NA ANATOMIA DO TEGUMENTO E NA ARMAZENABILIDADE DE SEMENTES DE SOJA ‘55I57 RSF’

RESUMO

A soja é uma cultura de grande relevância econômica, especialmente no Brasil, maior produtor mundial. Entre as cultivares, destaca-se a ‘55I57 RSF’, reconhecida pelo alto potencial produtivo, embora apresente desafios quanto à qualidade fisiológica das sementes, possivelmente associados à maior suscetibilidade a danos mecânicos e térmicos. A secagem é um fator determinante para a preservação da qualidade fisiológica das sementes, uma vez que a intensidade da remoção de água influencia diretamente a integridade dos tecidos. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da secagem contínua e intermitente no potencial de armazenamento de sementes de soja ‘55I57 RSF’ e nos aspectos anatômicos do tegumento após a secagem. Para isso, sementes colhidas na safra 2023/24, com aproximadamente 18% de teor de água (b.u.), foram submetidas à secagem contínua e intermitente, nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, em estufa de circulação de ar, até atingirem 12% de teor de água (b.u.). Na secagem intermitente, o processo foi interrompido quando as sementes atingiram aproximadamente 15% de teor de água, seguido de um período de repouso de 3 h e posterior retomada da secagem até 12%. Após a secagem, as sementes foram armazenadas em câmara fria e avaliadas quanto à qualidade fisiológica imediatamente após a secagem (tempo zero) e aos 3, 6 e 9 meses de armazenamento. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial triplo $2 \times 4 \times 4$, constituído por dois métodos de secagem, quatro temperaturas e quatro períodos de armazenamento, com quatro repetições. A qualidade fisiológica das sementes foi avaliada por meio dos testes de germinação, primeira contagem de germinação, emergência em canteiro, índice de velocidade de emergência, envelhecimento acelerado e condutividade elétrica. O tegumento foi caracterizado quanto ao teor de lignina, à espessura por microscopia de luz e à morfologia da superfície externa por microscopia eletrônica de varredura. A secagem contínua a 35 °C preservou a qualidade das sementes, mantendo germinação de 82,5% após 9 meses de armazenamento. A secagem contínua a 44 °C reduziu a germinação para 72,5% e resultou em fissuras no tegumento. A secagem intermitente a 35 °C mostrou-se prejudicial à qualidade das sementes, com germinação de 65,5% após 9 meses de armazenamento. Os valores de condutividade elétrica das sementes aumentaram ao longo do armazenamento e foram maiores na secagem intermitente, indicando

menor vigor das sementes. A espessura e a organização interna do tegumento não foram afetadas pelos métodos de secagem.

Palavras-chaves: *Glycine max* L. Merrill. Vigor. Temperatura de secagem. Condutividade elétrica.

ABSTRACT

Soybean is a crop of great economic relevance, especially in Brazil, the world's largest producer. Among the cultivars, '55I57 RSF' stands out for its high yield potential, although it presents challenges regarding seed physiological quality, possibly associated with greater susceptibility to mechanical and thermal damage. Drying is a determining factor for preserving seed physiological quality, since the intensity of water removal directly influences tissue integrity. This study aimed to evaluate the effects of continuous and intermittent drying on the storage potential of '55I57 RSF' soybean seeds and on seed coat anatomical characteristics after drying. For this purpose, seeds harvested in the 2023/24 growing season, with approximately 18% moisture content (wet basis), were subjected to continuous and intermittent drying at 35, 38, 41, and 44 °C in a forced-air circulation oven until reaching 12% moisture content (wet basis). In intermittent drying, the process was interrupted when the seeds reached approximately 15% moisture content, followed by a 3-h resting period and subsequent resumption of drying until 12% moisture content was reached. After drying, the seeds were stored in a cold chamber and evaluated for physiological quality immediately after drying (time zero) and after 3, 6, and 9 months of storage. The experiment was conducted in a completely randomized design in a $2 \times 4 \times 4$ factorial arrangement, consisting of two drying methods, four drying temperatures, and four storage periods, with four replications. Seed physiological quality was evaluated by germination, first germination count, seedling emergence in seedbed, emergence speed index, accelerated aging, and electrical conductivity tests. The seed coat was characterized for lignin content, thickness by light microscopy, and external surface morphology by scanning electron microscopy. Continuous drying at 35 °C preserved seed quality, maintaining germination at 82.5% after 9 months of storage. Continuous drying at 44 °C reduced germination to 72.5% and resulted in fissures in the seed coat. Intermittent drying at 35 °C was detrimental to seed quality, with germination of 65.5% after 9 months of storage. Seed electrical conductivity values increased throughout storage and were higher under intermittent drying, indicating lower seed vigor. Seed coat thickness and internal organization were not affected by the drying methods.

Keywords: *Glycine max* L. Merrill, Vigor, Temperature drying. Electrical conductivity.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), originária da China e pertencente à família Fabaceae, é uma das culturas agrícolas mais importantes no mundo (SALEEM *et al.*, 2021). O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de soja e, na safra 2024/25, alcançou produção recorde de aproximadamente 171,5 milhões de toneladas, com as regiões Centro-Oeste e Sul figurando como as principais áreas produtoras do país (CONAB, 2025). A qualidade das sementes é essencial para o estabelecimento da cultura e depende de atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários.

Nesse contexto, a seleção de genótipos com alto potencial produtivo e adequada qualidade de sementes é essencial para a produção de soja. A cultivar BMX 55I57 RSF IPRO ('Zeus') destaca-se pelo seu alto potencial produtivo (ARAÚJO *et al.*, 2024). No entanto, essa cultivar pode apresentar desafios quanto à qualidade fisiológica das sementes, possivelmente associados à maior suscetibilidade a danos mecânicos e térmicos durante as operações de colheita e pós-colheita. Dessa forma, compreender os fatores relacionados à proteção e à manutenção da integridade das sementes desse genótipo é importante para o estabelecimento de estratégias que contribuam para a preservação de sua qualidade.

Entre as estruturas relacionadas à proteção das sementes, o tegumento desempenha papel essencial na proteção das sementes contra danos mecânicos e estresses ambientais, contribuindo diretamente para a manutenção da germinação e do vigor (MARCOS-FILHO, 2015a; KRZYZANOWSKI *et al.*, 2023). Alterações estruturais ou químicas nesse tecido podem comprometer a integridade das sementes. Assim, sua avaliação, associada ao desempenho fisiológico das sementes, pode contribuir para a compreensão das diferenças na tolerância aos estresses impostos durante as etapas pós-colheita.

Entre essas etapas, a secagem é fundamental para a preservação da qualidade fisiológica das sementes, pois reduz o teor de água e a atividade metabólica (ANTUNES *et al.*, 2024). A temperatura adequada da massa de sementes varia de acordo com o teor de água inicial e o genótipo, situando-se, geralmente, entre 38 e 43 °C (GOMES *et al.*, 2023). Na secagem contínua, mantém-se um fluxo constante de ar aquecido, enquanto a secagem intermitente alterna ciclos de aquecimento e repouso (GARCIA *et al.*, 2004). Embora existam recomendações para a secagem de sementes de soja, a resposta de cultivares específicas, como a '55I57 RSF', a diferentes métodos e temperaturas de secagem ainda é insuficientemente compreendida, especialmente quanto aos possíveis efeitos sobre a qualidade fisiológica durante o armazenamento e sobre a integridade do tegumento.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da secagem contínua e intermitente, em diferentes temperaturas, sobre o potencial de armazenamento de sementes de soja ‘55I57 RSF’ e sobre as características anatômicas do tegumento após a secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Para obtenção das sementes, realizou-se o plantio de soja, cultivar Brasmax 55I57 RSF IPRO (Zeus), na safra 2023/24, em área de aproximadamente 450 m², na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão em Manejo, Produção e Melhoramento de Hortaliças Graníferas Oleaginosas, Forragens e Eucalipto – UEPE MHGF Horta Nova, pertencente ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa – Minas Gerais, Brasil, cujas coordenadas geográficas são: 20°45'49"S 42°49'24"W.

A semeadura manual foi realizada no dia 20 de novembro de 2023, em sistema de plantio convencional, com aração e gradagem. O espaçamento entre linhas de plantio foi de 0,5 m e a densidade de semeadura de 14 plantas por metro linear, resultando em uma população de aproximadamente 280.000 plantas por hectare. As sementes foram tratadas com fungicida (Metalaxil-M + Fludioxonil) e inoculante à base de *Bradyrhizobium japonicum*. A adubação de plantio foi realizada com base na análise química do solo, sendo aplicado 200 kg ha⁻¹ de N-P-K na formulação 6-30-6.

O manejo químico de plantas daninhas foi realizado com a aplicação dos herbicidas Glifosato (ZAPP QI 620®) e Cletodim (SELECT 240 EC®), conforme a necessidade, durante o desenvolvimento da cultura. O controle de pragas (*Diabrotica speciosa*, *Bemisia tabaci*, *Anticarsia gemmatilis*, *Piezodorus guildinii*, *Euschistus heros*) foi realizado com os inseticidas CONNECT® (Imidacloprido + Beta-ciflutrina), KLORPAN 480 EC® (Clorpirifós) e SIVANTO PRIME 200 SL® (Flupiradifurona). Para o controle preventivo de doenças, utilizaram-se os fungicidas APPROVE® (Tiofanato-metílico + Fluazinam) e NATIVO® (Tebucocanazol + Trifloxistrobina). A aplicação de Boro foi realizada via foliar, nos estádios V5 e R1, utilizando o produto ACTIVE BORO SL®.

Na Figura 1, são apresentados os valores médios de precipitação, temperatura e umidade relativa registrados durante o período de condução do campo de sementes. Houve um período significativo de estiagem após o plantio, sendo necessária a instalação e realização de irrigação complementar (aspersão) até a estabilização das chuvas.

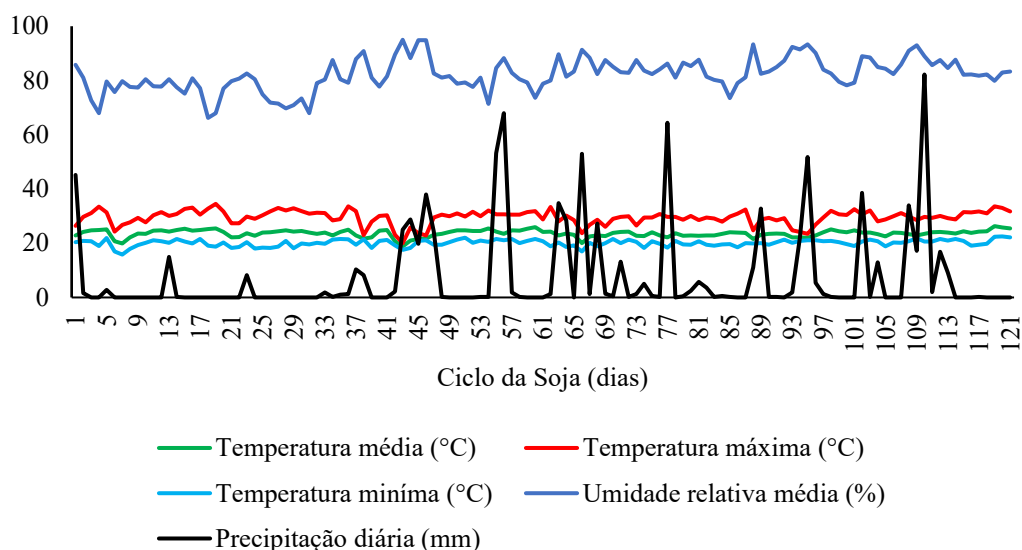


Figura 1. Dados diários de precipitação, temperaturas média, máxima e mínima e umidade relativa média do ar, durante o período de condução do experimento em campo. Fonte: INMET (2024).

A dessecação em pré-colheita foi realizada no estágio reprodutivo R7.3, caracterizado por plantas com mais de 75% das vagens e folhas amareladas, considerado como o melhor momento para dessecação da soja destinada a sementes (ALBRECHT *et al.*, 2022). Para essa finalidade, foi utilizado o herbicida REGLONE® (Diquate), na dose de 2,0 litros por hectare.

A colheita foi realizada manualmente, com o arranquio das plantas, quando as sementes apresentavam teor de água de aproximadamente 18% (base úmida). Esse teor de água caracteriza a maturidade de campo e, em geral, é compatível com a operação de colheita/trilha mecanizada, sem aumento expressivo de danos associados a sementes ainda muito úmidas, além de demandar secagem para adequação ao armazenamento (FRANÇA-NETO *et al.*, 2016). Após o arranquio, as plantas foram trilhadas em uma trilhadora elétrica (Vencedora B-150 PV), utilizando-se a velocidade mínima do equipamento, com o objetivo de minimizar danos mecânicos adicionais nas sementes.

Após a trilha, as sementes foram transportadas para o Laboratório de Pesquisa de Sementes da Universidade Federal de Viçosa e limpas manualmente. O tamanho das sementes foi padronizado por peneiramento, resultando em um lote homogêneo com diâmetros entre 6,0 e 7,5 mm. Antes da secagem, a qualidade fisiológica inicial do lote padronizado de sementes foi caracterizada por meio da primeira contagem de germinação e da germinação, cujos valores foram de 88,0 e 90,0%, respectivamente. Em seguida, o lote padronizado de sementes foi submetido à secagem contínua ou intermitente, nas temperaturas do ar de secagem de 35, 38, 41 e 44 °C, em estufa com circulação forçada e renovação de ar (TE-394/2-MP, Tecnal), até

atingir 12% de teor de água (b.u.). As temperaturas avaliadas corresponderam à temperatura do ar de secagem. No método de secagem contínua, as temperaturas médias do ar de secagem foram de 34,7; 37,6; 40,6 e 43,8 °C, com valores correspondentes de umidade relativa de 53,4; 47,6; 42,6 e 35,7%, respectivamente. No método de secagem intermitente, as temperaturas médias do ar de secagem foram de 34,6; 37,7; 40,5 e 43,7 °C, com valores correspondentes de umidade relativa de 55,2; 49,0; 42,0 e 36,7%, respectivamente.

As temperaturas de secagem foram selecionadas de modo a abranger condições brandas, intermediárias e mais severas de secagem para sementes de soja, incluindo valores próximos aos comumente recomendados para a secagem e uma temperatura mais elevada, visando avaliar possíveis danos imediatos e latentes na cultivar ‘55I57 RSF’. O teor de água final de 12% (b.u.) foi adotado por ser considerado adequado para o armazenamento seguro de sementes de soja, especialmente em embalagens permeáveis, uma vez que reduz a atividade metabólica e o risco de deterioração durante o armazenamento (FRANÇA-NETO *et al.*, 2016).

Secagem contínua: em cada temperatura, foram utilizadas quatro repetições de aproximadamente 1,5 kg de sementes, acondicionadas em sacos de náilon perfurado (56,0 × 48,0 cm), dispostas em camada única, com espessura aproximada de 6,0–7,5 mm, correspondente à faixa de diâmetro das sementes.

Secagem intermitente: em cada temperatura, o processo foi interrompido quando as sementes atingiram 15% de teor de água (b.u.) e retomado após um período de repouso de 3 horas, prosseguindo até atingir 12%. O período de repouso de 3 h foi definido com base na viabilidade operacional e adaptado de estudos sobre secagem intermitente de sementes (VERGARA *et al.*, 2018), nos quais períodos de repouso são utilizados para permitir a redistribuição da água no interior das sementes e reduzir os gradientes de umidade e temperatura durante a secagem. O repouso foi conduzido em caixa de poliestireno expandido completamente vedada, simulando condições de silo, com capacidade de 25 L (0,43 m de comprimento; 0,33 m de largura; 0,31 m de altura; 0,03 m de espessura), com monitoramento da temperatura e da umidade relativa por meio de termohigrômetro digital (MABASSO *et al.*, 2022; MABASSO *et al.*, 2023). Durante o período de repouso, as temperaturas médias do ar e as umidades relativas no interior da caixa foram de 27,3 °C e 70,0%; 28,5 °C e 76,0%; 29,1 °C e 78,0%; e 30,0 °C e 79,0%, para os tratamentos com temperaturas do ar de secagem de 35, 38, 41 e 44 °C, respectivamente.

Para a secagem intermitente, o tempo efetivo de secagem foi considerado como o período durante o qual as sementes permaneceram expostas ao ar de secagem aquecido, enquanto o tempo total de secagem incluiu o período de repouso de 3 h.

Para ambos os métodos de secagem, a perda de água das sementes foi monitorada gravimetricamente por meio da pesagem periódica de cada repetição. Os intervalos de pesagem foram ajustados de acordo com a etapa da secagem, adotando-se intervalos menores à medida que os teores de água-alvo se aproximavam, especialmente próximos a 15 e 12% (b.u.). A massa-alvo de cada repetição foi determinada de acordo com a Eq. 1, assumindo matéria seca constante durante a secagem (CELESTINO, 2010):

$$Mf = \frac{Mi (100-MCi)}{(100-MCf)} \quad (1)$$

Mf: massa-alvo da repetição no teor de água desejado (kg);

Mi: massa inicial da repetição (kg);

MCi: teor de água inicial (% b.u.); e

MCf: teor de água-alvo (% b.u.).

Após atingir a massa-alvo, o teor de água final das sementes foi verificado pelo método da estufa a 105 ± 3 °C, de acordo com BRASIL (2025a). O tempo de secagem (h) foi registrado desde o início do processo até que cada repetição atingisse 12% de teor de água (b.u.). Após a secagem, as sementes foram avaliadas imediatamente (tempo zero) e, posteriormente, acondicionadas em embalagens permeáveis de papel Kraft e armazenadas em câmara fria ($12,9 \pm 1,7$ °C; $61,2 \pm 4,8\%$ de UR) por 3, 6 e 9 meses.

A câmara fria foi utilizada para simular condições controladas de armazenamento comumente adotadas para lotes de sementes, reduzindo as oscilações de temperatura e umidade relativa e, consequentemente, minimizando a deterioração durante o armazenamento. O período de armazenamento de 9 meses, com avaliações em intervalos de 3 meses, foi adotado para representar o intervalo usual entre o beneficiamento pós-colheita e o uso das sementes de soja na safra seguinte, permitindo a avaliação dos efeitos imediatos e latentes da secagem sobre a qualidade fisiológica das sementes ao longo do armazenamento (FRANÇA-NETO *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2019).

As avaliações realizadas no tempo zero e após 3, 6 e 9 meses de armazenamento foram:

Teor de água (TA) - foi realizado pelo método da estufa a 105 ± 3 °C, com quatro repetições de 5 g de sementes, conforme BRASIL (2025a). Os resultados foram expressos em porcentagem (%).

Teste de germinação (G) - foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes, utilizando-se como substrato o papel germitest, umedecido com água destilada na proporção de 2,5 vezes o seu peso seco. Os rolos de papel com as sementes foram mantidos em câmara de germinação à temperatura de 25 °C. As avaliações foram realizadas aos 5 (primeira contagem) e 8 dias, computando-se as plântulas normais. Os resultados foram expressos em porcentagem (%) (BRASIL, 2025b).

Teste de condutividade elétrica (CE) – quatro repetições de 50 sementes intactas foram pesadas em uma balança de precisão. As sementes foram colocadas em copos descartáveis, nos quais foram adicionados 75 mL de água destilada. Os copos com as sementes e água foram colocados em câmara de germinação (B.O.D.), a 25 °C, por 24 horas. Posteriormente, a condutividade elétrica da solução de embebição das sementes foi medida, utilizando um medidor de condutividade (Digimed, modelo DM-32). Os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ (VIEIRA & MARCOS, 2020).

Envelhecimento acelerado (EA) – foi realizado distribuindo-se sementes de cada tratamento em camada única sobre uma tela metálica, utilizando-se quantidade suficiente para preencher completamente a tela (aproximadamente 200 sementes), fixada no interior de uma caixa plástica do tipo “gerbox”, contendo no fundo 40 mL de água destilada. Em seguida, as caixas tampadas foram colocadas em câmara B.O.D., a 41 °C, por 24 horas. Após este período, foram retiradas quatro repetições de 50 sementes de cada tratamento, as quais foram colocadas para germinar, de acordo com a metodologia descrita para o teste de germinação, e o número de plântulas normais foi avaliado aos 5 dias após a instalação do teste, com os resultados expressos em porcentagem (%) (MARCOS-FILHO, 2020).

Emergência em canteiro (E) – foi conduzida em canteiro, utilizando-se quatro repetições de 50 sementes por tratamento, semeadas à profundidade de 3 cm. Durante a emergência, realizou-se irrigação periódica para manter o solo próximo à capacidade de campo, determinada por avaliação visual. A porcentagem de emergência foi calculada computando-se o total de plântulas emergidas após a completa estabilização do estande. Foram consideradas emergidas, as plântulas que se apresentaram com os cotilédones acima da superfície do solo (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2020).

Índice de velocidade de emergência (IVE) – foi calculado a partir dos valores diários obtidos do número de plantas emergidas, do primeiro ao último dia de duração do teste de emergência, conforme MAGUIRE (1962).

Para avaliação das características anatômicas do tegumento de sementes de soja, foram realizadas análises histoquímicas, microscopia eletrônica de varredura e determinação do teor

de lignina, exclusivamente nas sementes provenientes do tempo zero de armazenamento (imediatamente após a secagem). As análises foram conduzidas conforme metodologias descritas a seguir:

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) – foi realizada utilizando duas sementes de cada tratamento, escolhidas aleatoriamente. Cada semente foi cortada ao meio com o auxílio de uma lâmina de aço, utilizando-se para análise a metade com o hilo. As amostras foram então fixadas em suportes metálicos, com a região do hilo voltada para cima e, posteriormente, metalizadas com ouro (metalizador “Sputter Coater” Quorum Q150RS), visando conferir condutividade elétrica para a análise em MEV. A parte externa do tegumento de cada amostra foi visualizada e fotografada utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL JSM-6010LA), no Laboratório de Física da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG, seguindo procedimentos usuais de preparo e metalização de amostras para MEV, com adaptações (ZHANG *et al.*, 2023).

Teor de lignina – foi determinado pelo método de hidrólise ácida, de acordo com o protocolo INCT-CA F-005/1, após extração prévia da fibra em detergente ácido do tegumento das sementes (DETMANN *et al.*, 2021). Para cada tratamento, foram obtidos 2,4 g de tegumento puro a partir de uma amostra composta, posteriormente divididos em quatro alíquotas técnicas de 0,6 g. As alíquotas foram tratadas com solução de detergente ácido, utilizando-se aproximadamente 100 mL g⁻¹ de amostra, e autoclavadas a 105 °C por 1 h para remoção dos compostos solúveis em detergente ácido. O resíduo insolúvel foi retido por filtração a vácuo e lavado com água destilada quente.

Posteriormente, o resíduo foi submetido à hidrólise ácida com H₂SO₄ 12 mol L⁻¹ durante 3 h, com homogeneização após 30 min. Após a hidrólise, o material foi filtrado a vácuo e lavado com água destilada quente até a completa remoção do ácido. Em seguida, o resíduo foi seco em estufa a 105 °C por 16 h, resfriado em dessecador e pesado. Posteriormente, o material seco foi incinerado em forno mufla a 500–550 °C por 2 h, resfriado em dessecador e novamente pesado para determinação do resíduo mineral.

O teor de lignina foi calculado pela diferença entre a massa do resíduo obtido após a hidrólise ácida e a massa do resíduo mineral após a incineração, com correção para a base seca em estufa, sendo os resultados expressos em porcentagem da massa seca do tegumento. Não foi aplicada correção por branco de reagentes. O controle de qualidade do procedimento incluiu o uso de cadinhos filtrantes previamente secos e pesados, balança analítica calibrada com precisão de 0,0001 g, controle das temperaturas de secagem e incineração, lavagens sequenciais para remoção dos resíduos de ácido e utilização de quatro alíquotas técnicas por tratamento.

Anatomia e espessura do tegumento (análise histoquímica) – foram determinadas por microscopia de luz, utilizando 10 sementes por tratamento. Cada semente foi cortada ao meio com o auxílio de uma lâmina de aço, utilizando-se para análise a metade com o hilo, as quais foram imersas em solução fixadora de formalina 10% tamponada (FNT 10%). Após 24 horas, as amostras foram removidas do FNT e o tegumento separado do cotilédono com auxílio de uma pinça. Posteriormente, foram realizados cortes transversais no tegumento, utilizando lâmina de aço. As seções transversais foram coradas com azul de astra 1% por 180 segundos (s) e safranina 0,1% por 30 s. Foram observadas as camadas de células paliçádicas (macroesclerídeos), ampulhetas (osteoesclerídeos) e parenquimáticas. As imagens foram obtidas utilizando um microscópio óptico (AX70 TRF, Olympus Optical, Tóquio, Japão) acoplado a uma câmera digital (Zeiss AxioCam HRc, Göttingen, Alemanha). A espessura de cada camada foi medida por meio do software ImageJ®, sendo determinadas as seguintes variáveis: espessura das camadas de células paliçádicas (CP), espessura das camadas de células em ampulhetas (CA) e a espessura oriunda do somatório das duas camadas (CPA). Os resultados foram expressos em micrômetros (μm).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial triplo $2 \times 4 \times 4$, composto pelos fatores: métodos de secagem (contínua e intermitente), temperaturas de secagem (35, 38, 41 e 44°C) e períodos de armazenamento (0, 3, 6 e 9 meses). Cada unidade experimental consistiu em embalagens individuais contendo 210 g de sementes. Para cada combinação dos fatores, utilizaram-se 4 repetições, totalizando 128 unidades experimentais. As embalagens foram completamente aleatorizadas, sendo que cada período de armazenamento foi avaliado em unidades independentes, as quais foram descartadas após cada avaliação.

Os pressupostos da análise de variância foram verificados por meio dos testes de Shapiro–Wilk, para normalidade dos resíduos, e de Bartlett, para homogeneidade das variâncias. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5% de significância, utilizando o software R (R CORE TEAM, 2024). As análises do fatorial triplo, bem como os desdobramentos em caso de interação significativa, foram conduzidas com auxílio do pacote ExpDes. Para o fator método de secagem, de natureza qualitativa, a comparação entre médias foi realizada pelo teste F ($p \leq 0,05$). Para os fatores temperatura de secagem e período de armazenamento, de natureza quantitativa, procedeu-se à análise de regressão, selecionando-se os modelos com base na significância dos coeficientes e na adequação do ajuste.

Para a variável condutividade elétrica, adicionalmente, realizou-se a análise dos dados separadamente dentro de cada método de secagem (contínua e intermitente), e os efeitos

conjuntos de temperatura e armazenamento foram representados por superfícies de resposta (gráficos 3D) ajustadas por regressão no R (pacote rsm), como ferramenta complementar para facilitar a interpretação do comportamento da CE ao longo do gradiente de temperatura e tempo. Esse procedimento foi aplicado especificamente à condutividade elétrica por sua natureza quantitativa e por permitir visualizar de forma mais clara o padrão de resposta e a eventual presença/ausência de interação entre os fatores quantitativos.

As análises histoquímicas e a microscopia eletrônica por varredura foram avaliadas usando estatística descritiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de água das sementes de soja, após os processos de secagem contínua e intermitente, atingiu cerca de 12%, conforme observado nas Figuras 2A, 2B e 2C. O tempo necessário para atingir esse teor de água foi de aproximadamente 14, 11, 8 e 7 horas, a 35, 38, 41 e 44 °C, respectivamente, tanto para a secagem contínua quanto para a intermitente (considerando o tempo efetivo de secagem). Verifica-se que o tempo de secagem das sementes de soja diminui com o aumento da temperatura do ar, conforme esperado. Esse efeito ocorre porque o aumento da temperatura eleva o gradiente de pressão entre o interior da semente e o ar circundante (GARCIA-LLOBODANIN & BILLIRIS, 2023), resultando em uma secagem mais rápida. Esse processo é físico e, em grande parte, controlado pela difusão e pela pressão de vapor de água (MABASSO *et al.*, 2023).

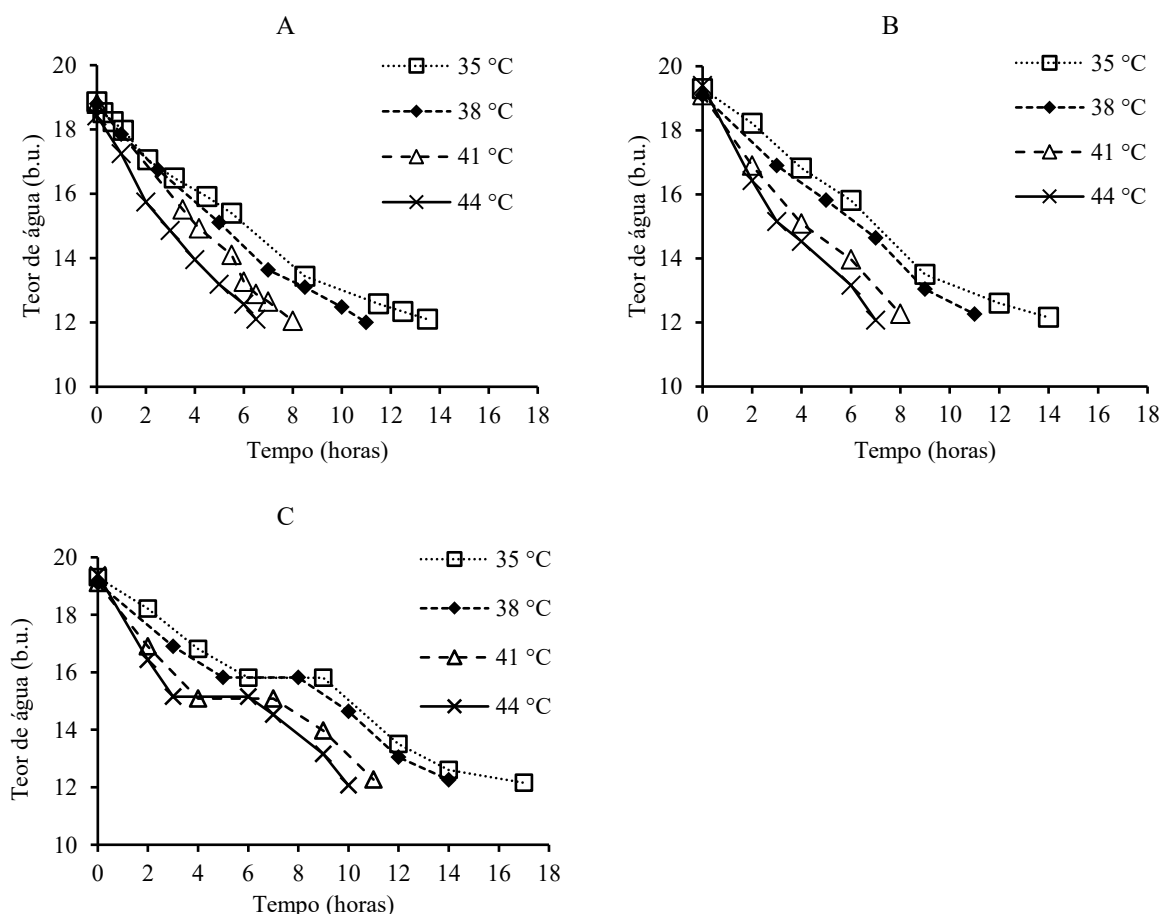


Figura 2. Teor de água em função do tempo de secagem pelo método contínuo (A), pelo método intermitente considerando o tempo efetivo de secagem (B) e pelo método intermitente considerando o tempo de repouso (C), para sementes de soja ‘55I57 RSF’.

A redução do tempo de secagem diminui a exposição das sementes a condições desfavoráveis, como proliferação de microrganismos e risco de fermentação, o que é especialmente relevante para a soja, de alto teor de óleo e suscetível à peroxidação lipídica. Contudo, temperaturas elevadas durante a secagem podem comprometer a qualidade fisiológica, por causarem danos aos sistemas de membranas e desnaturação de proteínas (ROSA *et al.*, 2023; MIRESKI *et al.*, 2019).

O teor de água das sementes diminuiu de 12% para 10% após três meses de armazenamento, mantendo-se praticamente constante até nove meses (Figura 3). Essa queda inicial ocorreu porque as sementes foram acondicionadas em embalagens de papel Kraft, material permeável que permite a troca de umidade com o ambiente. Nessa condição, a umidade relativa do ar e a temperatura ($12,9 \pm 1,7$ °C e $61,2 \pm 4,8\%$ UR) conduziram as sementes ao equilíbrio higroscópico em torno de 10%. Ressalta-se que a variação do teor de água foi de apenas dois pontos percentuais, fator essencial para a comparação dos testes de qualidade fisiológica (MARCOS-FILHO, 2015a), uma vez que essa variável influencia diretamente os resultados.

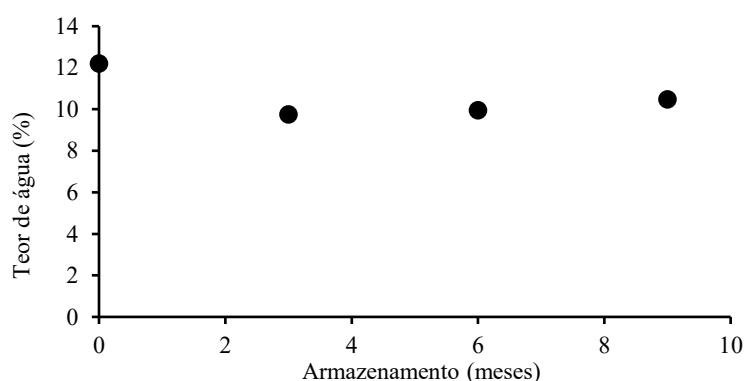


Figura 3. Teor de água médio de sementes de soja ao longo do armazenamento.

A Tabela 1 resume a análise de variância das variáveis avaliadas durante o armazenamento de sementes de soja ‘55I57 RSF’ submetidas a diferentes métodos e temperaturas de secagem. Houve interação significativa entre os três fatores — método de secagem, temperatura e tempo de armazenamento — para germinação, primeira contagem de germinação, emergência e envelhecimento acelerado. Por outro lado, a condutividade elétrica e o índice de velocidade de emergência apresentaram apenas interações duplas.

Tabela 1. Valores dos quadrados médios das fontes de variação, de acordo com os tratamentos avaliados, para as variáveis germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), emergência em canteiro (E), índice de velocidade de emergência (IVE), envelhecimento acelerado (EA) e condutividade elétrica (CE) de sementes de soja ‘55I57 RSF’

FV	G	PCG	E	IVE	EA	CE
S	741,125**	1845,281**	309,382**	2,673**	595,125**	1864,459**
T	32,458*	64,385*	21,528 ^{ns}	0,261 ^{ns}	7,812 ^{ns}	7,265 ^{ns}
ARM	726,208**	1774,177**	971,549**	67,018**	1417,041**	1007,163**
S*T	171,125**	799,593**	231,028**	2,769**	534,645**	127,671**
S*ARM	20,708 ^{ns}	28,177 ^{ns}	35,466*	0,166 ^{ns}	9,041 ^{ns}	220,976**
T*ARM	10,097 ^{ns}	28,670 ^{ns}	5,709 ^{ns}	0,0932 ^{ns}	9,118 ^{ns}	10,462 ^{ns}
S*T*ARM	19,708**	45,822*	20,528*	0,198 ^{ns}	8,95**	16,838 ^{ns}
CV (%)	3,74	6,80	3,93	7,24	2,94	2,70

FV – Fonte de variação; - S – Método de secagem; T – Temperatura; ARM – Armazenamento e; CV – Coeficiente

de variação. * - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ** - Significativo a 1% de probabilidade pelo teste

F; ns - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A germinação foi influenciada pelos métodos e pelas temperaturas de secagem ao longo do armazenamento. Na secagem contínua, as temperaturas não diferiram entre si até o sexto mês. No nono mês, contudo, o aumento da temperatura resultou em redução da germinação. No regime intermitente, por outro lado, diferenças entre as temperaturas do ar de secagem foram detectadas já no tempo zero, com 41 e 44 °C proporcionando os maiores percentuais de germinação, embora esse resultado tenha sido menos evidente ao longo do armazenamento. Esses resultados podem ser verificados na Tabela 2, que apresenta os modelos lineares de regressão do efeito da temperatura, ajustados separadamente dentro de cada combinação de método de secagem e tempo de armazenamento, para germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), emergência (E) e envelhecimento acelerado (EA).

Tabela 2. Modelos lineares de regressão para temperatura dentro de cada nível ‘método de secagem’ e ‘tempo de armazenamento’ em sementes de soja ‘55I57 RSF’, avaliando germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), emergência (E) e envelhecimento acelerado (EA).

VR	ARM (meses)	TEMP (°C)				SEC	REG	R ²
		35	38	41	44			
G	0	87,0	88,0	88,0	88,0	CONT	NF	-
		80,0	83,0	86,0	87,0	INT	$\hat{Y} = 54,25^{**} + 0,75^{**}X$	0,931
	3	85,2	84,0	84,5	82,0	CONT	NF	-
		76,5	77,5	79,0	82,0	INT	NF	-
	6	83,5	80,0	80,0	79,0	CONT	NF	-
		75,0	76,0	78,0	80,0	INT	NF	-
	9	82,5	79,0	78,0	72,5	CONT	$\hat{Y} = 116,72^{**} - 0,98^{**}X$	0,922
		65,5	66,5	76,5	75,0	INT	$\hat{Y} = 20,18^{*} + 1,28^{**}X$	0,767
PCG	0	78,2	74,5	78,0	69,5	CONT	$\hat{Y} = 105,01^{**} - 0,75^{**}X$	0,517
		60,5	63,5	69,2	72,0	INT	$\hat{Y} = 14,24^{ns} + 1,31^{**}X$	0,976
	3	75,5	74,0	74,5	66,0	CONT	$\hat{Y} = 109,36^{**} - 0,93^{*}X$	0,681
		57,0	61,0	62,5	72,0	INT	$\hat{Y} = 3,75^{ns} + 1,50^{**}X$	0,900
	6	69,5	62,0	61,5	61,0	CONT	$\hat{Y} = 97,73^{**} - 0,86^{**}X$	0,696
		50,5	59,0	62,0	61,0	INT	$\hat{Y} = 14,55^{**} + 1,10^{**}X$	0,684
	9	66,0	55,5	55,0	53,0	CONT	$\hat{Y} = 110,30^{**} - 1,34^{**}X$	0,772
		43,0	44,0	52,0	64,0	INT	$\hat{Y} = -42,73^{*} + 2,36^{**}X$	0,891
E	0	88,0	87,0	88,0	84,5	CONT	NF	-
		83,2	84,0	87,5	88,0	INT	NF	-
	3	84,2	83,7	84,2	80,0	CONT	NF	-
		76,0	79,0	80,5	84,0	INT	$\hat{Y} = 47,23^{**} + 0,83^{**}X$	0,983
	6	83,0	80,5	79,0	78,5	CONT	NF	-
		76,0	77,5	79,5	80,0	INT	NF	-
	9	82,0	75,0	74,5	72,5	CONT	$\hat{Y} = 114,18^{**} - 0,97^{**}X$	0,817
		63,5	66,5	74,5	76,0	INT	$\hat{Y} = 12,07^{ns} + 1,47^{**}X$	0,922
EA	0	80,0	74,0	71,0	70,0	CONT	$\hat{Y} = 117,20^{**} - 1,10^{**}X$	0,896
		65,0	67,5	70,0	70,0	INT	$\hat{Y} = 46,93^{**} + 0,53^{**}X$	0,826
	3	72,0	66,0	65,5	64,5	CONT	$\hat{Y} = 97,28^{**} - 0,77^{**}X$	0,767
		60,0	61,0	66,0	68,0	INT	$\hat{Y} = 25,57^{**} + 0,97^{**}X$	0,940
	6	70,0	64,0	62,0	61,5	CONT	$\hat{Y} = 100,58^{**} - 0,92^{**}X$	0,828
		52,0	59,0	63,7	65,0	INT	$\hat{Y} = 1,41^{**} + 1,48^{**}X$	0,929
	9	63,0	59,0	54,0	51,5	CONT	$\hat{Y} = 108,88^{**} - 1,32^{**}X$	0,985
		48,0	50,5	56,0	58,0	INT	$\hat{Y} = 8,23^{ns} + 1,13^{**}X$	0,955

VR – Variável resposta; ARM – Armazenamento; TEMP – Temperatura de secagem; SEC – método de secagem;

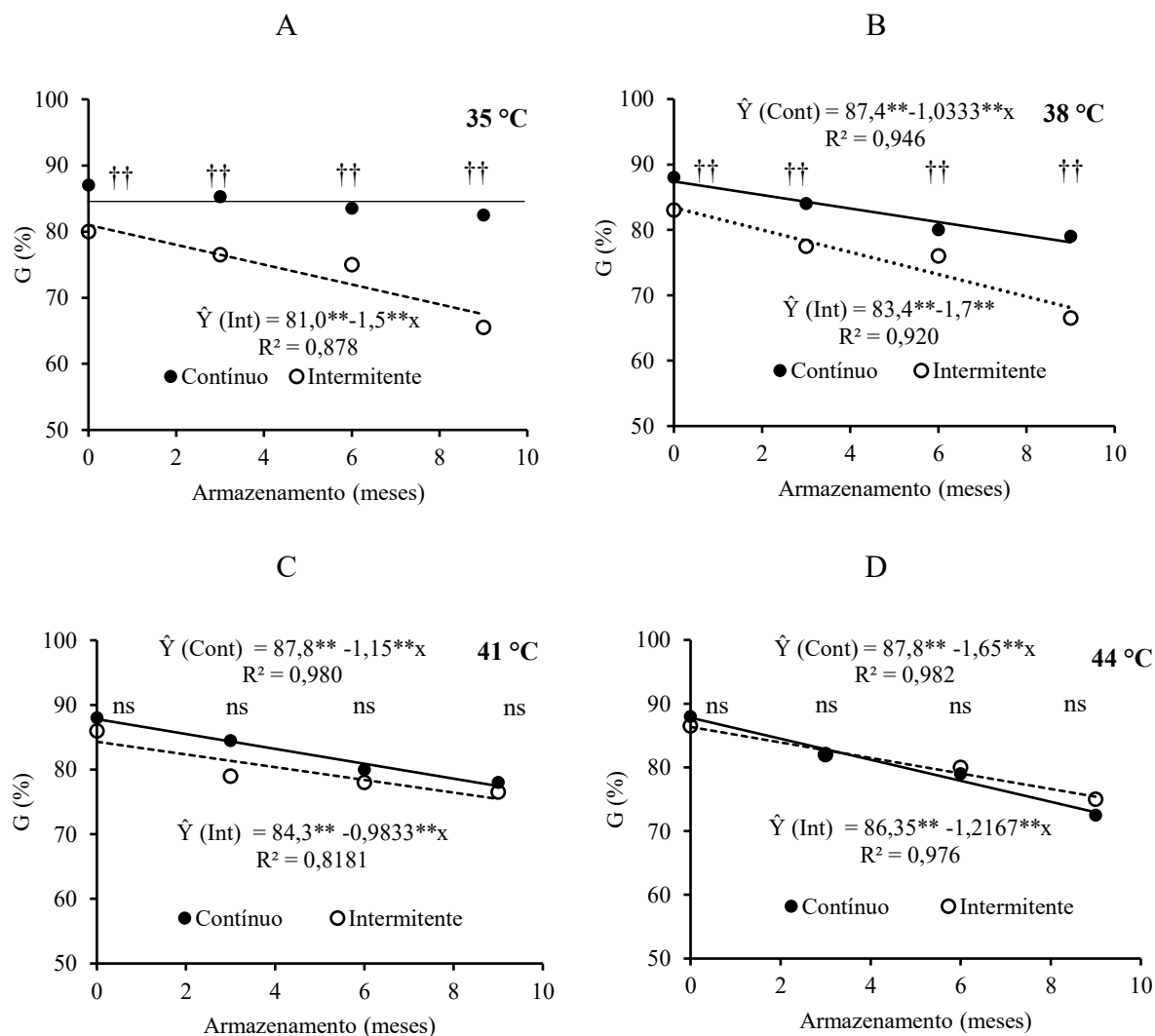
CONT – secagem contínua; INT – Secagem intermitente; REG – Regressão; ** Coeficientes significativos a 1%

de probabilidade pelo teste t; * Coeficientes significativos a 5% de probabilidade pelo teste t; ns - não significativo

pelo teste t; NF – não significativo pelo teste F.

Ainda em relação à germinação, a comparação entre os métodos de secagem indicou ausência de diferença entre a secagem contínua e a secagem intermitente nas temperaturas de

41 e 44 °C (Figuras 4C e 4D). Em contraste, nas temperaturas de 35 e 38 °C, a secagem contínua apresentou desempenho superior ao método intermitente (Figuras 4A e 4B). Dentre os tratamentos avaliados, destacou-se a secagem contínua a 35 °C, na qual não se observou redução significativa do poder germinativo ao longo de todo o período de armazenamento (Figura 4A). Esses resultados evidenciam a superioridade dessa condição para a preservação da qualidade fisiológica das sementes de soja ‘55I57 RSF’.

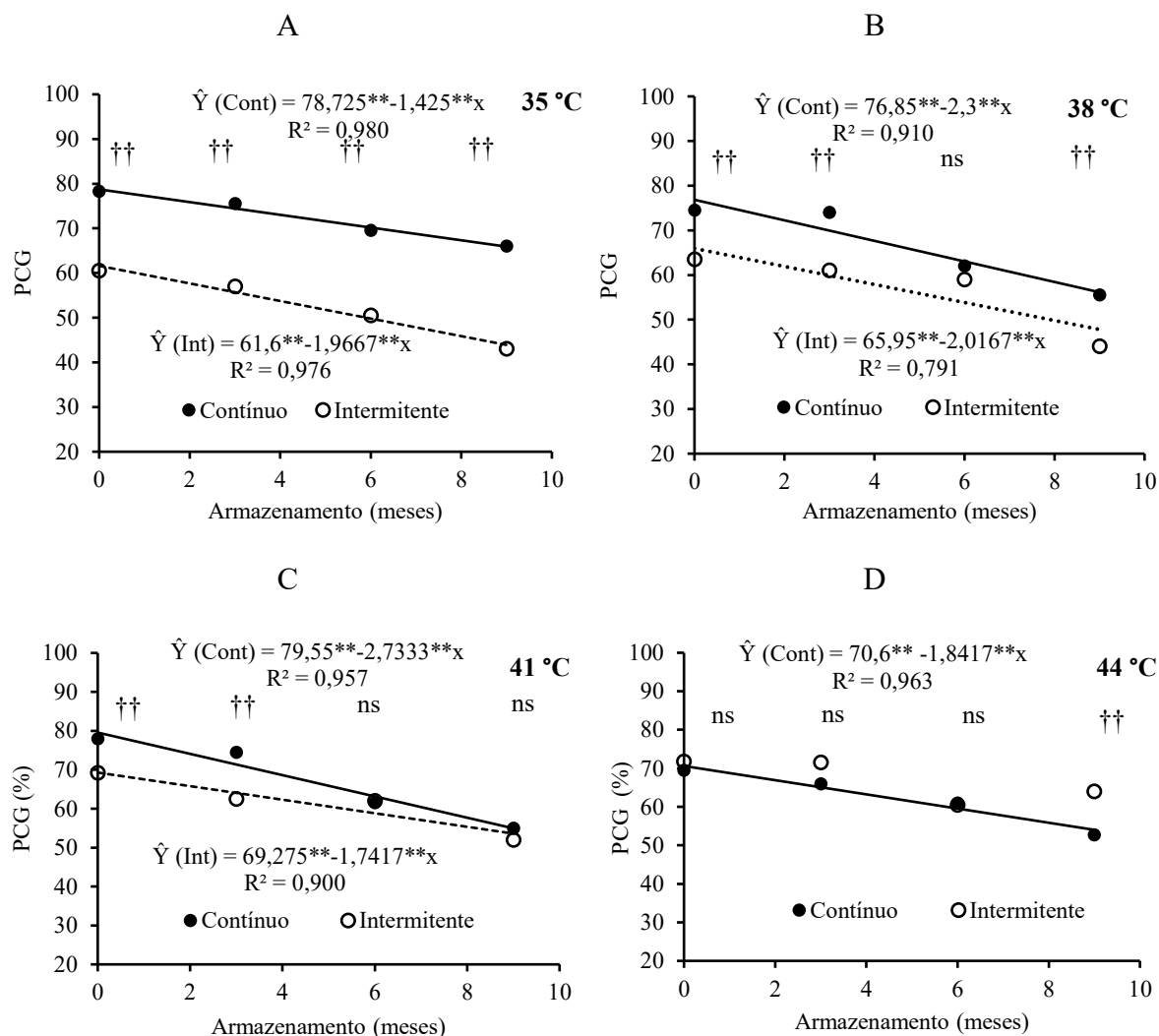


†† Diferença significativa entre métodos de secagem a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo; ** coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t; Cont = secagem contínua; Int = secagem intermitente. As linhas representam os ajustes de regressão, sendo a linha contínua referente à secagem contínua e a linha pontilhada à secagem intermitente.

Figura 4. Germinação de sementes de soja submetidas à secagem contínua e intermitente nas temperaturas de 35 °C (A), 38 °C (B), 41 °C (C) e 44 °C (D), em função do tempo de armazenamento.

Do ponto de vista prático, destaca-se que apenas a secagem contínua a 35 °C manteve a germinação acima de 80% mesmo após 9 meses de armazenamento (Figura 4A). Esse resultado é relevante porque 80% é o padrão mínimo de germinação exigido para a comercialização de sementes de soja (C1, C2, S1 e S2), conforme a Instrução Normativa MAPA nº 45/2013 (BRASIL, 2013). Assim, esse tratamento tende a oferecer maior “margem de segurança” quando se prevê armazenamento prolongado, reduzindo o risco de o lote ficar abaixo do limite regulamentar.

A avaliação do vigor pela primeira contagem de germinação (PCG) evidenciou, de modo geral, maior desempenho da secagem contínua nas temperaturas de 35 e 38 °C ao longo do armazenamento (Figuras 5A e 5B), com exceção do período de 6 meses a 38 °C, em que não houve diferença significativa entre os métodos (Figura 5B). A 41 °C, a vantagem da secagem contínua manteve-se até 3 meses (Figura 5C). Já a 44 °C, não se observaram diferenças entre os métodos até 6 meses; entretanto, aos 9 meses, houve vantagem do método intermitente (Figura 5D). Considerando o efeito da temperatura dentro de cada período de armazenamento, os modelos de regressão (Tabela 2) indicam, em geral, redução da PCG com o aumento da temperatura na secagem contínua, enquanto na secagem intermitente a resposta depende do período de armazenamento avaliado.



†† Diferença significativa entre métodos de secagem a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo; ** Coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t; Cont – Secagem contínua; Int – Secagem intermitente. As linhas representam os ajustes de regressão, sendo a linha contínua referente à secagem contínua e a linha pontilhada à secagem intermitente. Para a secagem intermitente a 44 °C, o modelo não foi significativo e, portanto, a linha de regressão não foi apresentada.

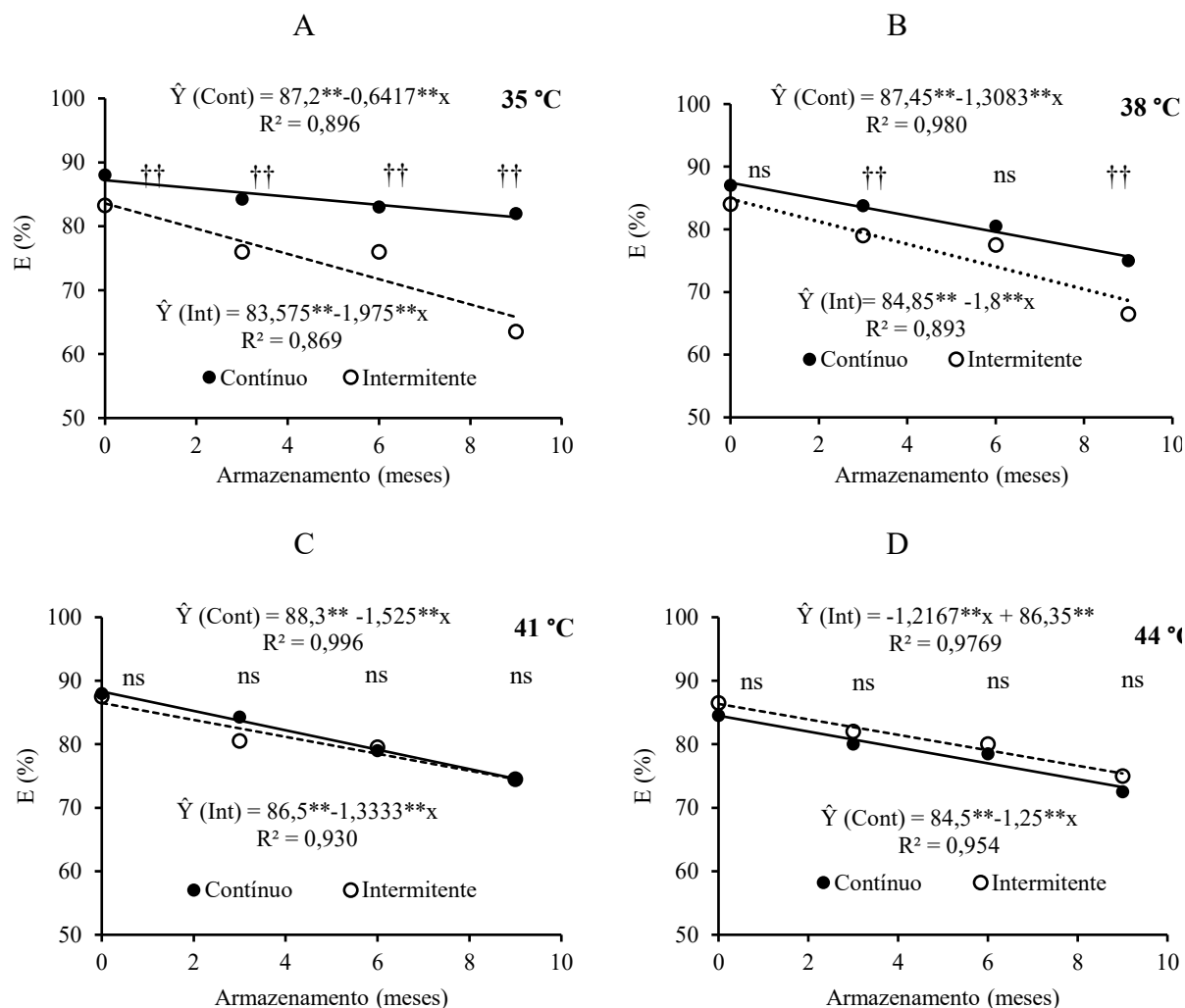
Figura 5. Primeira contagem de germinação (PCG) de sementes de soja submetidas à secagem contínua e intermitente, nas temperaturas de 35 °C (A), 38 °C (B), 41 °C (C) e 44 °C (D), em função do tempo de armazenamento.

Entre os tratamentos, a secagem contínua, especialmente a 35 °C, destacou-se como a condição mais eficiente para preservar o vigor das sementes de soja ‘55I57 RSF’, uma vez que a primeira contagem de germinação (PCG) é um teste sensível ao avanço da deterioração e se baseia no princípio de que lotes que apresentam maior porcentagem de plântulas normais na primeira contagem são os mais vigorosos, refletindo maior capacidade de germinar de forma rápida e uniforme e formar plântulas em menor tempo (MENEGUZZO *et al.*, 2022).

Menores valores de germinação e de primeira contagem sob secagem contínua foram observados a 41 e 44 °C. HARTMANN FILHO *et al.* (2016, 2017) demonstraram que o uso de temperaturas acima de 40 °C na secagem contínua de sementes de soja compromete a qualidade fisiológica, particularmente a germinação. Resultados semelhantes foram relatados por SOUZA *et al.* (2022), também para sementes de soja. Esse efeito pode ser explicado pelo estresse térmico, que pode causar desnaturação de proteínas, desorganização das membranas celulares e redução da viabilidade do embrião. Além disso, temperaturas elevadas aumentam a produção de espécies reativas de oxigênio, intensificando os danos oxidativos a lipídios, proteínas e DNA e interferindo na mobilização de reservas, resultando em menor desempenho fisiológico (HUANG *et al.*, 2021).

Por outro lado, o comportamento observado sob secagem intermitente, com melhor preservação da germinação e da primeira contagem em temperaturas mais elevadas, pode estar relacionado aos períodos de repouso, que reduzem a exposição contínua ao ar aquecido e favorecem a redistribuição interna de água na semente, atenuando danos físicos e fisiológicos (VERGARA *et al.*, 2018). Além disso, temperaturas mais elevadas podem acelerar a remoção de água, reduzindo o tempo em que as sementes permanecem com maiores teores de água — condição que favorece a deterioração —, contribuindo, assim, para a preservação da qualidade durante a secagem.

A emergência apresentou comportamento semelhante ao da germinação (Figura 6). Contudo, na secagem contínua a 35 °C observou-se redução linear da qualidade fisiológica ao longo do armazenamento, tendência não verificada para a germinação. De modo geral, os percentuais de germinação são superiores aos de emergência, pois o teste de germinação é realizado em condições controladas e ideais de temperatura e umidade, ao passo que o teste de emergência ocorre em condições de campo, sujeitas a variações ambientais nem sempre favoráveis.

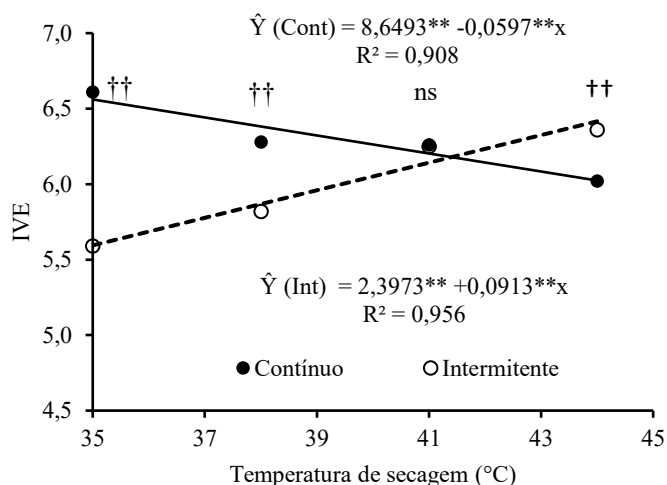


†† Diferença significativa entre métodos de secagem a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo; ** Coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t; Cont – Secagem contínua; Int – Secagem intermitente. As linhas representam os ajustes de regressão, sendo a linha contínua referente à secagem contínua e a linha pontilhada à secagem intermitente

Figura 6. Emergência em canteiro (E) de sementes de soja submetidas à secagem contínua e intermitente, nas temperaturas de 35 °C (A), 38 °C (B), 41 °C (C) e 44 °C (D), em função do tempo de armazenamento.

Os valores do índice de velocidade de emergência (IVE) de sementes de soja submetidas a diferentes métodos e temperaturas de secagem estão presentes na Figura 7. Na secagem contínua, observou-se redução do IVE com o incremento da temperatura, ao passo que, na secagem intermitente, verificou-se tendência oposta, com aumento do IVE à medida que a temperatura se elevou. De modo geral, a secagem contínua resultou em maiores valores de IVE a 35 e 38 °C, enquanto, a 44 °C, a secagem intermitente superou a contínua. Salienta-se que o

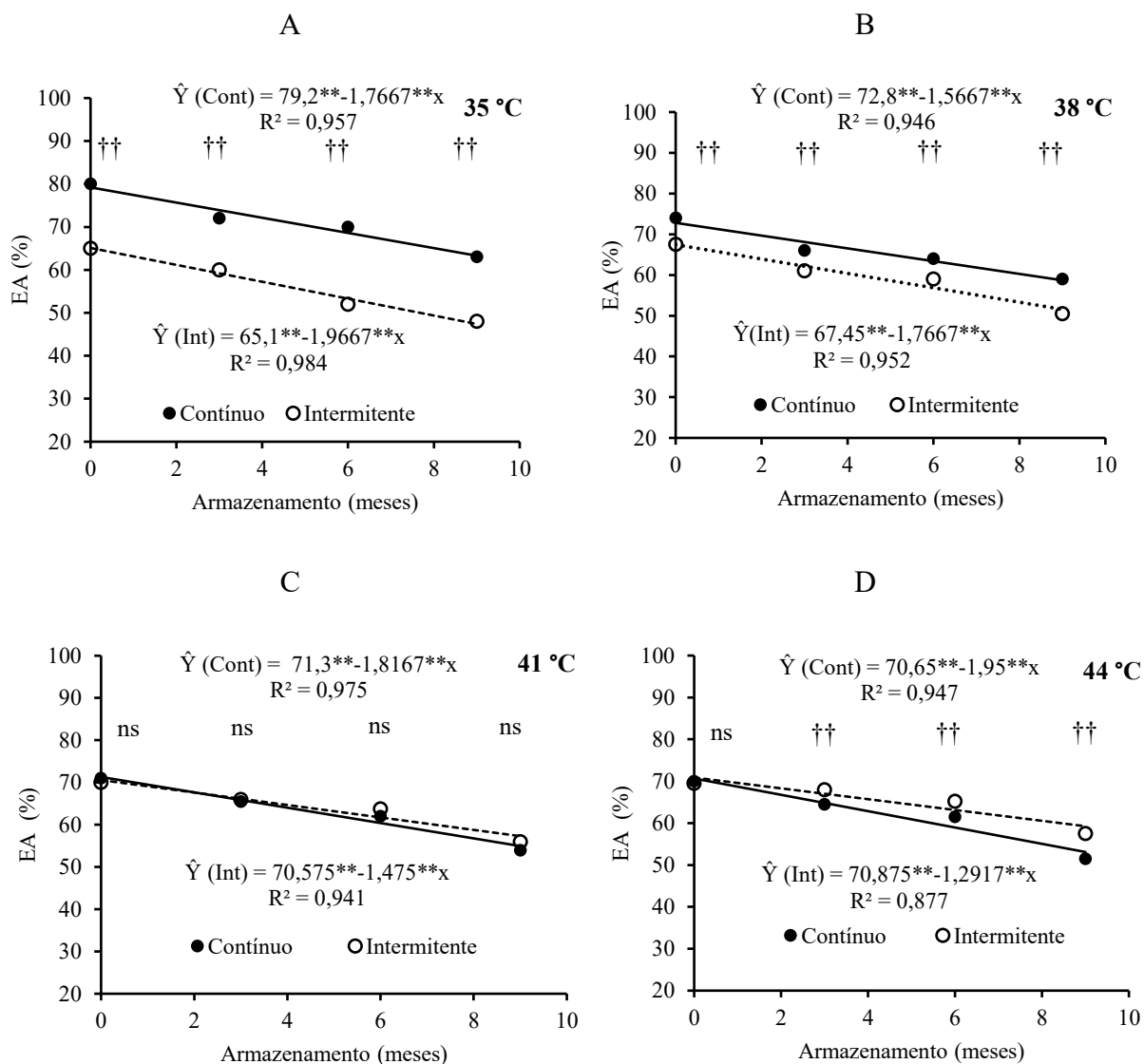
IVE foi fortemente influenciado pelas condições ambientais, prejudicando assim o estudo de seu comportamento ao longo do armazenamento.



†† Diferença significativa entre métodos de secagem a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo; ** Coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t; Cont – Secagem contínua; Int – Secagem intermitente. As linhas representam os ajustes de regressão, sendo a linha contínua referente à secagem contínua e a linha pontilhada à secagem intermitente

Figura 7. Índice de velocidade de emergência (IVE) de sementes de soja submetidas à secagem contínua e intermitente em diferentes temperaturas.

Os resultados do envelhecimento acelerado das sementes de soja ‘55I57 RSF’ (Figura 8) mostraram redução do vigor ao longo do armazenamento, independentemente do método de secagem e da temperatura avaliada. A 35 °C e 38 °C (Figuras 8A e 8B), a secagem contínua proporcionou os maiores valores de vigor; a 41 °C (Figura 8C), não foram observadas diferenças significativas entre os métodos; e a 44 °C (Figura 8D), a secagem intermitente passou a ser superior a partir do terceiro mês de armazenamento.



†† Diferença significativa entre métodos de secagem a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo;

** Coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t; Cont – Secagem contínua; Int – Secagem intermitente. As linhas representam os ajustes de regressão, sendo a linha contínua referente à secagem contínua e a linha pontilhada à secagem intermitente.

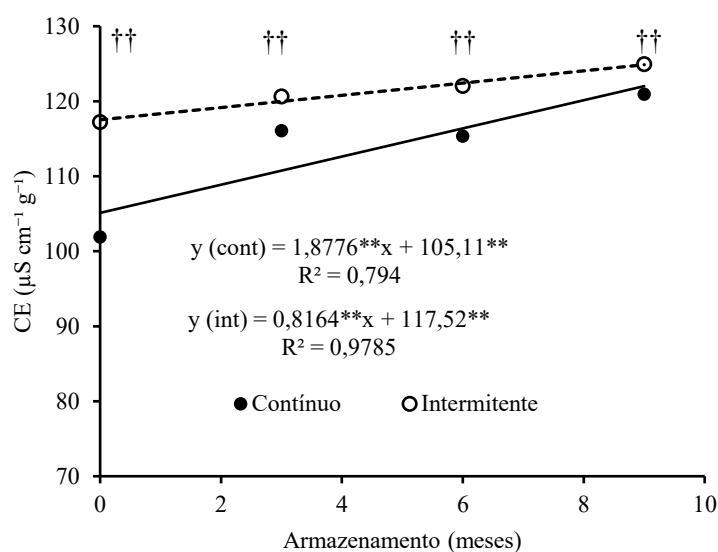
Figura 8. Envelhecimento acelerado (EA) de sementes de soja submetidas à secagem contínua e intermitente nas temperaturas de 35 °C (A), 38 °C (B), 41 °C (C) e 44 °C (D), em função do tempo de armazenamento.

Além da diminuição dos valores de EA com o tempo, as equações de regressão indicam que o processo de secagem afetou tanto o nível inicial de vigor quanto a velocidade de deterioração durante o armazenamento. Em 35 e 38 °C, a secagem contínua apresentou valores iniciais mais elevados e menor declínio por unidade de tempo, sugerindo maior preservação da longevidade das sementes sob temperaturas moderadas. Em 41 °C, a semelhança entre os

métodos aponta para uma condição intermediária, na qual o efeito do método de secagem sobre o vigor foi minimizado.

Em 44 °C, embora os valores iniciais tenham sido próximos, a secagem contínua resultou em queda mais acentuada do EA, enquanto a intermitente apresentou redução mais gradual, tornando-se superior após o terceiro mês. Esse comportamento sugere a presença de danos latentes associados ao estresse térmico e/ou ao aumento de gradientes de umidade na secagem contínua em temperatura elevada, efeitos que tendem a se intensificar com o armazenamento (HARTMANN FILHO *et al.*, 2016; SCARIOT *et al.*, 2020). Quanto à temperatura, considerando períodos fixos de armazenamento, os resultados de EA indicaram tendência linear decrescente no método contínuo e linear crescente no intermitente (Tabela 2), reforçando que a escolha do método deve levar em conta, simultaneamente, a temperatura de secagem e o tempo previsto de armazenamento, especialmente quando se busca maior estabilidade do vigor ao longo da estocagem.

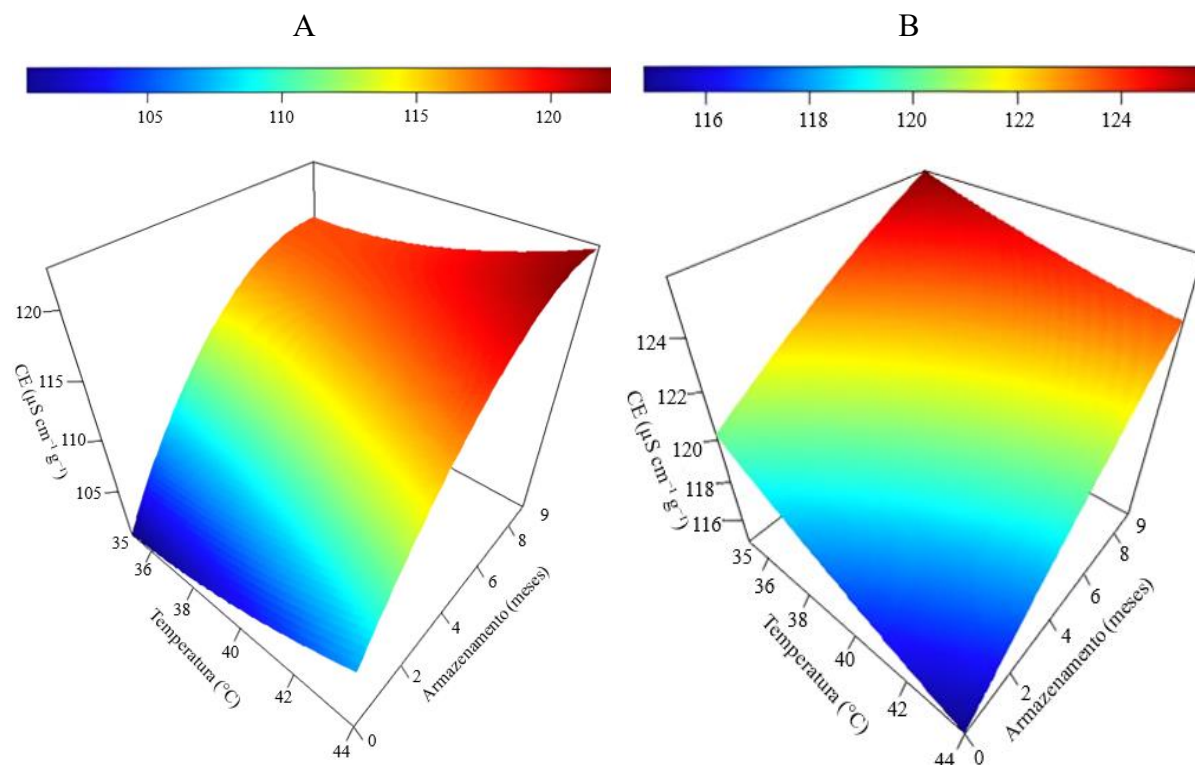
A condutividade elétrica (CE) foi influenciada pelo método de secagem, pela temperatura do ar e pelo armazenamento. Em todos os períodos de armazenamento, a secagem contínua apresentou menores valores de condutividade elétrica do que a intermitente, indicando maior integridade de membranas e, portanto, melhor qualidade fisiológica das sementes (Figura 9). Valores elevados de condutividade elétrica refletem maior liberação de exsudatos para o meio, sinalizando maior deterioração e menor vigor (MARCOS-FILHO, 2015a; OLIVEIRA *et al.*, 2026). Assim, infere-se que a secagem intermitente promoveu maior desorganização/danos às membranas, comprometendo a reorganização durante a embebição e reduzindo o vigor. Ressalta-se, ainda, que, independentemente do método, o avanço do período de armazenamento resultou em aumento da condutividade elétrica, evidenciando a progressão natural da deterioração.



†† Diferença significativa entre métodos de secagem a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo; ** Coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t; Cont – Secagem contínua; Int – Secagem intermitente. As linhas representam os ajustes de regressão, sendo a linha contínua referente à secagem contínua e a linha pontilhada à secagem intermitente.

Figura 9. Condutividade elétrica (CE) de sementes de soja submetidas à secagem contínua e intermitente em função do tempo de armazenamento.

Na Figura 10 estão representadas as superfícies de resposta da condutividade elétrica (CE) das sementes de soja em função da temperatura de secagem e do período de armazenamento, nos métodos contínuo (A) e intermitente (B). Na secagem contínua (A), observa-se que o aumento da temperatura de secagem está associado a maiores valores de CE, indicando maior comprometimento da integridade de membranas. Esse efeito torna-se mais acentuado com o avanço do armazenamento: em períodos mais longos, a elevação da temperatura resulta em incrementos mais expressivos de CE, evidenciando que a combinação de temperaturas elevadas com armazenamento prolongado é especialmente prejudicial à qualidade fisiológica das sementes.



Secagem contínua

$$CE = 164,131943^* - 3,852755^{ns} \cdot TEMP + 5,186525^{**} \cdot ARM + 0,057915^{ns} \cdot TEMP^2 - 0,239061^{**} \cdot ARM^2 - 0,029301^{ns} \cdot (TEMP \cdot ARM)$$

$$R^2 = 82,89\%$$

Secagem intermitente

$$CE = 157,001459^{ns} - 1,398667^{ns} \cdot TEMP - 0,666444^{ns} \cdot ARM + 0,009955^{ns} \cdot TEMP^2 - 0,013667^{ns} \cdot ARM^2 + 0,040656^{ns} \cdot (TEMP \cdot ARM)$$

$$R^2 = 40,47\%$$

TEMP – Temperatura de secagem (°C); ARM – Período de armazenamento (meses); ns = não significativo; * Coeficientes significativos a 5% de probabilidade pelo teste t; ** Coeficientes significativos a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 10. Superfícies de resposta da condutividade elétrica (CE) de sementes de soja em função da temperatura de secagem (35, 38, 41 e 44 °C) e do período de armazenamento (0, 3, 6 e 9 meses), submetidas à secagem contínua (A) e intermitente (B).

Na secagem intermitente (Figura 10B), a CE aumenta com o avanço do armazenamento e com a redução da temperatura. Esse comportamento é mais uniforme do que na secagem contínua, com variação semelhante ao longo das temperaturas de secagem, o que sugere menor dependência da resposta em relação à combinação entre temperatura e armazenamento. Além disso, o modelo apresentou baixo poder explicativo ($R^2 = 40,47\%$), indicando ajuste limitado aos dados. Ainda assim, destaca-se que a secagem contínua foi superior, pois apresentou menores valores de CE em todas as temperaturas avaliadas quando comparada ao método intermitente (Figura 9), indicando maior integridade de membranas. Do ponto de vista aplicado,

esses resultados sugerem que a secagem contínua deve ser conduzida com temperaturas mais moderadas, sobretudo quando se prevê armazenamento das sementes por períodos mais longos.

Resultados semelhantes aos observados neste estudo para a secagem contínua foram reportados por OLIVEIRA *et al.* (2011), ao avaliarem diferentes condições de secagem em sementes de sorgo por meio da condutividade elétrica. Os autores verificaram que a exposição a temperaturas mais elevadas durante a secagem esteve associada a maiores valores de CE, indicando maior lixiviação de solutos e, conseqüentemente, maior desorganização de membranas. Esse comportamento tornou-se mais evidente após o armazenamento, quando sementes submetidas às condições mais severas de secagem (45 °C) passaram a apresentar valores superiores de CE em comparação às condições mais brandas, especialmente a partir de 3 meses. ULLMANN *et al.* (2015), ao avaliarem sementes de sorgo sacarino, observaram efeito imediato da temperatura, com aumento da CE logo após a secagem à medida que a temperatura do ar foi elevada. Em oleaginosas, SARATH *et al.* (2016) verificaram que temperaturas mais altas de secagem elevaram a CE já no tempo zero e intensificaram o aumento da lixiviação durante o armazenamento. Ao conduzir um experimento com secagem contínua em sementes de soja, SILVÉRIO *et al.* (2019) observaram maiores valores de CE nas regiões do secador associadas à maior intensidade de secagem (zonas inferiores), indicando maior dano nas sementes em condições que favorecem a supersecagem.

De forma geral, a literatura recomenda o uso de temperaturas mais elevadas do ar na secagem intermitente, sem, no entanto, elevar excessivamente a temperatura da massa de sementes durante o período de repouso (GARCIA *et al.*, 2004). Por outro lado, temperaturas mais baixas, como 35 °C, podem ser prejudiciais, pois aumentam significativamente o tempo de secagem e podem favorecer a deterioração das sementes, especialmente da soja, que tem alto teor de óleo e é suscetível à peroxidação lipídica (MARCOS-FILHO, 2015b). Dessa forma, observa-se que a secagem intermitente resultou em sementes mais deterioradas, algo confirmado pelos maiores valores de CE, especialmente a 35 e 38 °C.

Portanto, ficou evidente que, de acordo com as condições de realização desta pesquisa, a secagem contínua deve ser realizada em temperaturas mais amenas, se possível a 35 °C, enquanto a secagem intermitente permite o uso de temperaturas relativamente mais altas, entre 41 e 44 °C. BRITO *et al.* (2020), ao avaliarem o efeito da secagem contínua e intermitente em sementes de soja Intacta RR2 PRO, observaram que a secagem contínua com ar a 50 °C proporcionou maiores valores de germinação e maior vigor. Por outro lado, HARTMANN FILHO *et al.* (2017), ao estudarem o potencial fisiológico de sementes de soja SYN1059 RR

submetidas à secagem contínua com ar a 40 e 50 °C, encontraram maiores valores de germinação para a temperatura de 40 °C.

Vale destacar que o uso de temperaturas mais altas no processo de secagem pode levar à oxidação das membranas celulares das sementes, resultando na produção de radicais livres (HUANG *et al.*, 2021). Por outro lado, o emprego de temperaturas mais baixas permite redução gradual do teor de água e, conseqüentemente, o funcionamento dos mecanismos de tolerância à dessecação, o que contribui para a obtenção de lotes de sementes mais vigorosos (MARCOS-FILHO, 2015a).

A Tabela 3 apresenta as medidas estatísticas (moda, mediana e média) referentes à espessura das camadas de células paliçádicas, células em ampulheta, do conjunto paliçádicas + ampulheta das sementes de soja da cultivar 55I57 RSF, submetidas a diferentes métodos e temperaturas de secagem. Não foi observada influência dos métodos de secagem e das temperaturas empregados no presente estudo na espessura das camadas que compõem o tegumento da semente de soja, muito menos relação com os resultados dos testes de qualidade fisiológica, sendo a diferença encontrada atribuída a variabilidade presente nos cortes anatômicos e na própria anatomia do tegumento. Resultados semelhantes foram encontrados por MENEZES *et al.* (2009) e CASTRO *et al.* (2024), que não conseguiram estabelecer uma correlação entre qualidade fisiológica da semente e aspectos anatômicos do tegumento de soja.

Tabela 3. Espessura das camadas de células paliçádicas (CP), de células em ampulheta (CA) e do conjunto de células paliçádicas + ampulheta (CPA) de sementes de soja submetidas a diferentes métodos de secagem

Medidas de tendencia central	CP (µm)	CA (µm)	CPA (µm)
Moda	36,01	32,01	*A
Mediana	36,01	28,07	64,72
Média	35,87	29,27	65,15

*A – conjunto de dados sem moda, ou seja, nenhum valor se repete mais do que os outros.

As características do tegumento das sementes, como a espessura, variam entre os genótipos da mesma espécie (ABATI *et al.*, 2022). Ao comparar as médias de espessura das camadas de células paliçádicas, de células em ampulheta (CA) e do conjunto paliçádicas + ampulheta (CPA) da cultivar de soja ‘55I57 RSF’ com valores publicados para outras cultivares, observa-se que o tegumento dessa cultivar tende a ser menos espesso. CASTRO *et al.* (2024) estudaram a espessura das camadas de células que compõem o tegumento das sementes em 24 genótipos, dos quais apenas 4 apresentaram camadas de células paliçádicas e ampulheta menos espessas do que as observadas no presente trabalho. Ao avaliar exclusivamente as camadas de

células em ampulheta, todos os 24 genótipos apresentaram espessura maior do que o genótipo do presente estudo. Resultados semelhantes também foram obtidos por SILVA *et al.* (2008) e por MENEZES *et al.* (2009) em sementes de soja.

O tegumento das sementes é composto por três camadas distintas de células: paliçadas, em ampulheta e parenquimatosas (Figura 11). As células paliçadas, localizadas na camada mais externa, possuem estrutura alongada e compacta, atuando no controle da permeabilidade e como barreira física, protegendo a semente de danos mecânicos e ataques de microrganismos. Abaixo delas estão as células em ampulheta, que possuem formato característico e são responsáveis pela sustentação estrutural, conferindo firmeza ao tegumento e aumentando a resistência da semente a compressões e estresses físicos. As células parenquimatosas, por sua vez, são encarregadas de armazenar nutrientes e regular a troca de água e gases (ZENG *et al.*, 2005). De modo geral, camadas mais espessas, principalmente as externas, contribuem para tornar as sementes mais resistentes a danos mecânicos e pragas, favorecendo a preservação da qualidade fisiológica (RADCHUK & BORISJUK, 2014; MARCOS-FILHO, 2015a).

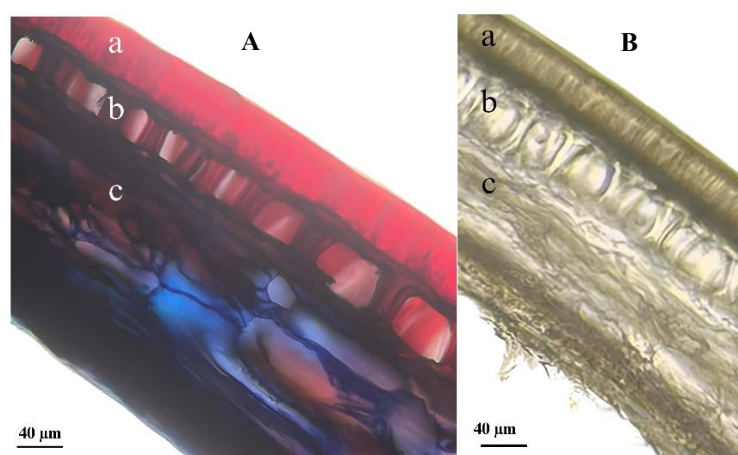


Figura 11. Seção transversal do tegumento de sementes de soja submetidas à secagem contínua a 35 °C, capturada por microscopia de luz (40×). Onde: a = camada paliçada; b = camada de células em ampulheta (osteoesclereídeos); c = parênquima lacunoso e A = corte transversal com coloração; B = corte transversal sem coloração.

Os métodos e as temperaturas de secagem não influenciaram o percentual de lignina no tegumento das sementes de soja, cuja média geral foi de 1,57%. Ressalta-se que o teor de lignina no tegumento é determinado pelas características genéticas da cultivar, embora também possa ser impactado por fatores ambientais (LEWIS & YAMAMOTO, 1990). CAVARIANI *et al.* (2009) encontraram valores mais elevados de lignina no tegumento de sementes de soja das cultivares Embrapa 48, BRS 184, BRS 232 e BRS 245RR, com médias de 1,94%, 1,95%, 2,01%

e 2,11%, respectivamente. Já BAHRY *et al.* (2015), ao avaliarem o percentual de lignina no tegumento de sementes das cultivares IAC, TP, CD2002 e Brasmax Potência RR, encontraram médias superiores às deste estudo, com valores de 8,26%, 4,99%, 1,77% e 3,33%, respectivamente.

Embora os tratamentos de secagem não tenham alterado o teor de lignina, a literatura indica que a maior lignificação do tegumento está associada a maior resistência a danos mecânicos, menor suscetibilidade à deterioração por intemperismo pré-colheita e, em alguns casos, menor lixiviação de solutos/conductividade elétrica, por contribuir para maior integridade e “rigidez” estrutural do tegumento (ALVAREZ *et al.*, 1997; CAPELETI *et al.*, 2005; HUTH *et al.*, 2016; KRZYZANOWSKI *et al.*, 2023). Assim, o valor relativamente baixo observado nesta cultivar (1,57%) pode representar um fator de predisposição a maior sensibilidade do tegumento a estresses de secagem e manuseio, embora a permeabilidade/entrada de água dependa também de características microestruturais, como a integridade da cutícula da camada paliçádica e a ocorrência de microfissuras (MA *et al.*, 2004; SOUZA; MARCOS-FILHO, 2001). Ademais, as temperaturas empregadas (35–44 °C) são muito inferiores às faixas em que se reportam alterações estruturais relevantes da lignina por degradação térmica, o que é compatível com a ausência de efeito dos tratamentos sobre esse constituinte (BREBU & VASILE, 2010; LU & GU, 2022).

Na Figura 12, observa-se a superfície externa de sementes de soja da cultivar 55I57 RSF submetidas a diferentes métodos e temperaturas de secagem, capturadas por microscopia eletrônica de varredura. Verifica-se que a secagem contínua resultou no aparecimento de trincas e rachaduras na região do hilo, especialmente a 44 °C (Figura 12G). Em contraste, na secagem intermitente, a incidência de trincas e rachaduras foi visivelmente menor (Figura 12B, D, F e H). A secagem contínua em altas temperaturas aumenta o risco de rachaduras no tegumento, especialmente no final do processo, devido à desproporção entre a energia fornecida e a água removida (KUMAR *et al.*, 2014). O procedimento intermitente, por sua vez, favorece uma melhor redistribuição da água e uma relação mais equilibrada entre a energia aplicada e a água extraída, reduzindo a ocorrência de rachaduras. Vale salientar que, na região do hilo, o tegumento apresenta diferenças celulares marcantes em relação ao restante da semente. Essas diferenças incluem um maior número de células parenquimatosas e camadas paliçádicas mais simples ou modificadas, adaptadas para favorecer o processo de germinação (CHAVAN *et al.*, 2021).

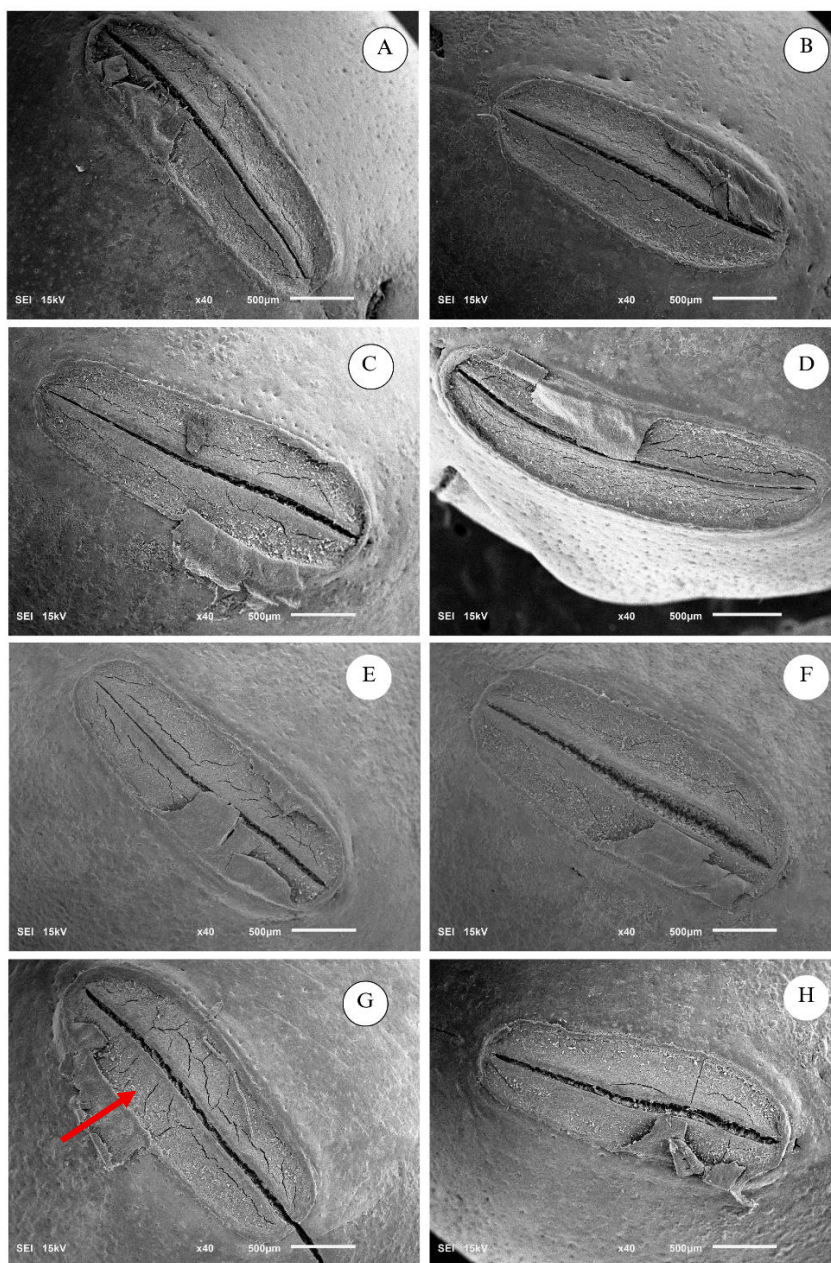


Figura 12. Região externa do tegumento de sementes de soja submetidas à secagem contínua a 35 °C (A), 38 °C (C), 41 °C (E) e 44 °C (G), e à secagem intermitente a 35 °C (B), 38 °C (D), 41 °C (F) e 44 °C (H), capturadas por microscopia eletrônica de varredura (40x).

Os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura estão alinhados com os testes de qualidade fisiológica, especialmente na secagem contínua, onde para temperatura de 44 °C foi observado menor vigor e tendência de redução na germinação e emergência. Na secagem contínua a 35 °C, observa-se um menor número de rachaduras, indicando que essa temperatura causa menos danos às sementes. Por outro lado, na secagem intermitente, essa correlação não foi verificada. Embora esse método tenha sido o mais prejudicial às sementes

nos testes de qualidade, não foi possível identificar danos externos visíveis. Isso sugere que a queda na qualidade das sementes pode estar mais relacionada ao processo de deterioração, possivelmente causado pelo atraso da secagem devido à permanência das sementes no período de repouso, especialmente em temperaturas mais baixas, e não por danos físicos. Contudo, vale salientar que essa interpretação deve ser considerada como uma hipótese, uma vez que a microscopia eletrônica de varredura avaliou apenas a superfície externa do tegumento. A confirmação dos mecanismos envolvidos exigiria análises adicionais, como indicadores independentes da integridade das membranas, do estresse oxidativo, seções anatômicas internas ou a avaliação da ultraestrutura do embrião.

Diversos trabalhos mostram que a cultivar 55I57 RSF apresenta desafios quanto à preservação da qualidade fisiológica de suas sementes (COPPO *et al.*, 2022; PANISSON *et al.*, 2022; TONI *et al.*, 2024). Tal fato pode estar relacionado à espessura e ao teor de lignina do tegumento dessa cultivar, ambos relativamente baixos, o que pode aumentar a suscetibilidade a danos, seja por ataque de pragas e doenças no campo, ou durante a colheita, secagem e beneficiamento. Com base nos resultados desta pesquisa, nota-se maior sensibilidade desse genótipo ao processo de secagem, recomendando-se o uso de temperaturas mais baixas, especialmente no método contínuo, com temperaturas entre 35 e 38 °C.

Por fim, embora o estudo aponte uma condição promissora para preservar a qualidade das sementes durante o armazenamento, seus achados não devem ser generalizados para a espécie, pois foram obtidos a partir de um único genótipo, uma única safra e um único lote. Recomenda-se ampliar as investigações com diferentes genótipos e lotes, bem como avaliar estratégias de secagem iniciadas em teores de água de colheita mais elevados, considerando os avanços nas colhedoras que, futuramente, poderão viabilizar a colheita da soja com grau de umidade em torno de 25% (PESKE & PESKE, 2024), aproximando-a de estádios fenológicos mais próximos da maturidade fisiológica (50–55%) e reduzindo o tempo de permanência das sementes no campo.

CONCLUSÃO

Na secagem contínua, sementes de soja '55I57 RSF' mais vigorosas foram obtidas com 35 °C, enquanto, a 44 °C, houve perda de qualidade fisiológica e aparecimento de rachaduras no tegumento.

Com a secagem intermitente, especialmente em baixas temperaturas, houve redução da qualidade fisiológica das sementes.

Com base na avaliação anatômica descritiva, não foram observadas alterações evidentes na espessura do tegumento ou em sua organização interna entre os métodos de secagem.

REFERÊNCIAS

- ABATI, J.; ZUCARELI, C.; BRZEZINSKI, C. R.; LOPES, I. O. N.; KRZYZANOWSKI, F. C.; MORAES, L. A. C.; HENNING, F. A. Water absorption and storage tolerance of soybean seeds with contrasting seed coat characteristics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 44, n. 1, p. 1-10, 2022.
- ALBRECHT, L. P.; YOKOYAMA, A. S.; ALBRECHT, A. J. P.; KOSINSKI, R.; MILLEO, R.; SILVA, A. F. M. Glufosinate and diquat in pre-harvest desiccation of soybean at four phenological stages, and their impact on seed quality. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 82, n. 3, p.448-456, 2022.
- ALVAREZ, P. J. C.; KRZYZANOWSKI, F. C.; MANDARINO, J. M. G.; FRANÇA-NETO, J. B. Relationship between soybean seed coat lignin content and resistance to mechanical damage. **Seed Science and Technology**, v. 25, n. 2, p. 209-214, 1997.
- ANTUNES, A. M.; CORRÊA, J. L. G.; CARVALHO, E. R. Drying of soybean seeds and its influence on quality: a review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 18, n. 5, p. 272-279, 2024.
- ARAÚJO, T. G.; HARMS, K. L.; WAURECK, A. Influence of seeding density on agronomic characteristics and productivity of soybean cultivars. **Revista Scientia Rural**, v. 28, n. 1, p. 23-35, 2024.
- BAHRY, C. A.; ACUNHA, T. S.; FERNANDO, J. A.; CHAVES, F. C.; NARDINO, M.; ZIMMER, P. D. Chemical composition and structural characterization of contrasting colors of soybean seed coats. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3, p. 1913-1926, 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Capítulo 13 – Determinação do grau de umidade (rev. 1)**. In: BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Regras para Análise de Sementes (RAS) – WikiSDA*, 2025a. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RAS_2025/ras_2024_umidade. Acesso em: 25 dez. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Capítulo 4 – Teste de germinação (rev. 1.2)**. In: BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Regras para Análise de Sementes (RAS) – WikiSDA*, 2025b. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RAS_2025/cap_4_Germinacao_rev_1. Acesso em: 25 dez. 2025.

- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013. Estabelece normas específicas e padrões para a produção e a comercialização de sementes.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 set. 2013.
- BREBU, M.; VASILE, C. Thermal degradation of lignin – A review. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 44, n. 9-10, p. 353-363, 2010.
- BRITO, R. C.; ZACHARIAS, M. B.; FORTI, V. A.; FREIRE, J. T. Physical and physiological quality of intermittent soybean seeds drying in the spouted bed. **Drying Technology**, v. 39, n. 1, p. 820–833, 2020.
- CAPELETI, I.; BONINI, E. A.; FERRARESE, M. D. L. L.; TEIXEIRA, A. C. N.; KRZYZANOWSKI, F. C.; FERRARESE-FILHO, O. Lignin content and peroxidase activity in soybean seed coat susceptible and resistant to mechanical damage. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 27, n. 1, p. 103-108, 2005.
- CASTRO, E. M.; VON PINHO, E. V. R.; LIMA, A. E.; LABORY, C. R. G.; SANTOS, H. O.; ALVES, E.; GUERRA, A. F. R. Physiological quality, lignin and the ultrastructural characterization of soybean seeds. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, n. 1, p. 1-12, 2024.
- CAVARIANI, C.; TOLEDO, M. Z.; RODELLA, R. A.; FRANÇA NETO, J. B.; NAKAGAWA, J. Velocidade de hidratação em função de características do tegumento de sementes de soja de diferentes cultivares e localidades. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, p.30-39, 2009.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p. (Documentos, 276).
- CHAVAN, M.; B, F.; KUMAR, M. S.; UMASHANKAR, N.; VEENA, S.; ANIL, A.; LINGAIAH, H. B.; KAROSIYA, A. Micromorphology of palisade cuticle of bold seeded vegetable soybean and grain type soybean. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 10, n. 2, p. 898-902, 2021.
- CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos. Brasília, Safra 2024/25 – Décimo segundo levantamento**, p. 1-133, set. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/12o-levantamento-safra-2024-25>>. Acesso em: 23 ago. 2026.
- COPPO, C.; BRACCINI, A. L.; HENNING, F. A.; PEREIRA, R.; SILVA, B. G.; OLIVEIRA, S. M.; SANTOS, R. F.; BASTIANI, G. G.; CATELAN, L. C.; PROTZEK, H. M. C.; BORGES, Y. M. Interaction of mechanical damage and chemical treatment and its effects on soybean seed physiological quality. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 10, p. 34-42, 2022.

- DETMANN, E.; SILVA, L. F. C.; ROCHA, G. C.; PALMA, M. N. N.; RODRIGUES, J. P. P. *Métodos para análise de alimentos*. 2. ed. Visconde do Rio Branco, MG: Suprema, 2021. 350 p.
- FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P.; LORINI, I.; HENNING, F. A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82 p. (Embrapa Soja. Documentos, 380).
- GARCIA, D. C.; BARRO, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.603-608, 2004.
- GARCIA-LLOBODANIN, L.; BILLIRIS, A. Effect of the drying air conditions on the drying rate and milling quality of a long-grain rice variety. **Food Science and Technology**, v. 43, n. 1, p.1-7, 2023.
- GOMES, L. J. C.; FARIAS, T.; CARVALHO, T. C.; WAURECK, A. Secagem estacionária e intermitente e sua influência na qualidade das sementes de soja. **Revista Scientia Rural**, v. 27, n. 1, p. 1-10, 2023.
- HARTMANN FILHO, C. P.; GONELI, A. L. D.; MASETTO, T. E.; MARTINS, E. A. S.; OBA, G. C. The effect of drying temperatures and storage of seeds on the growth of soybean seedlings. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 4, p. 287-295, 2016.
- HARTMANN FILHO, C. P.; GONELI, A. L. D.; MASETTO, T. E.; MARTINS, E. A. S.; OBA, G. C. Physiological potential of soybean seeds after maturation and submitted to artificial drying. **Journal of Seed Science**, v.39, n.4, p.361-371, 2017.
- HUANG, Y.; LU, M.; WU, H.; ZHAO, T.; WU, P.; CAO, D. High drying temperature accelerates sunflower seed deterioration by regulating the fatty acid metabolism, Glycometabolism, and Absciscic acid/gibberellin balance. **Frontiers In Plant Science**, v. 121, n. 12, p. 1-16, 2021.
- HUTH, C.; MERTZ-HENNING, L. M.; LOPES, S. J.; TABALDI, L. A.; ROSSATO, L. V.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, F. A. Susceptibility to weathering damage and oxidative stress on soybean seeds with different lignin contents in the seed coat. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 4, p. 296-304, 2016.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática**, Viçosa, MG, Brasil. 2024.
- KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; GOMES JÚNIOR, F. G.; NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados em desempenho de plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B.; MARCOS FILHO, J. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. ABRATES, 2020. Cap. 2. p.79-140, 2020.

- KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. de B.; HENNING, F. A. Importance of the lignin content in the pod wall and seed coat on soybean seed physiological and health performances. **Journal of Seed Science**, v. 45, e202345006, 2023.
- KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, n. 1, p. 48-57, 2014.
- LEWIS, N. G.; YAMAMOTO, E. Lignin: occurrence, biogenesis and biodegradation. **Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 41, n. 1, p. 455-496, 1990.
- LU, X.; GU, X. A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 15, art. 106, 2022.
- MA, F.; CHOLEWA, E.; MOHAMED, T.; PETERSON, C. A.; GIJZEN, M. Cracks in the palisade cuticle of soybean seed coats correlate with their permeability to water. **Annals of Botany**, v. 94, n. 2, p. 213-228, 2004.
- MABASSO, G. A.; SIQUEIRA, V. C.; QUEQUETO, W. D.; RESENDE, O.; SCHOENINGER, V.; MARTINS, E. A. S.; ISQUIERDO, E. P. Microscopy of maize grains subjected to continuous and intermittent drying. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 44, p. 1-9, 2022.
- MABASSO, G. A.; SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; QUEQUETO, W. D.; SCHOENINGER, V.; SIMEONE, M. L. F.; MARTINS, E. A. S.; CRIPPA, D. S. The effect of intermittent drying with variable resting times on quality parameters of corn obtained after storage. **Lwt**, v. 182, p. 1-8, 2023.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p.176-77, 1962.
- MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina: ABRATES, 2015a. 659p.
- MARCOS-FILHO, J. Seed vigor testing an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363-374, 2015b.
- MARCOS-FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇANETO, J. B.; MARCOS-FILHO, J. (ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 2020. Cap. 4. p. 185-246.
- MENEGUZZO, M. R. R.; MENEGHELLO, G. E.; CARVALHO, I. R.; XAVIER, F. D. M.; GONÇALVES, V. P.; MAASS, D. W.; TEIXEIRA, S. B.; MARTINS, A. B. N.; LAUTENCHLEGER, F.; LÂNGARO, N. C. Initial development and physiological potential

of soybean and maize as a function of vigor level and seed size. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 4, p. 431–435, 2022.

MENEZES, M.; VON PINHO, E. V. R.; JOSÍ, S. C. B. R.; BALDONI, A.; MENDES, F. F. Aspectos químicos e estruturais da qualidade fisiológica de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1716-1723, 2009.

MIRESKI, M. C.; GUEDES, R. S.; WENDLING, I.; PENNA, M. L. P.; MEDEIROS, A. C. S. Secagem na viabilidade e desenvolvimento embrionário de sementes de *Ilex paraguariensis*. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1354-1362, 2019.

OLIVEIRA, J. A.; SILVA, T. T. A.; VON PINHO, É. V. R.; ABREU, L. A. S. Secagem e armazenamento de sementes de sorgo com alto e baixo teor de tanino. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 4, p. 699-710, 2011.

OLIVEIRA, L. P.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; MIGLIORINI, P.; BARBOSA, K. F.; CABRAL, J. C. O.; MABASSO, G. A. Traceability of soybean seed quality before and after transport under different conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 30, n. 2, e293216, 2026.

PANISSON, A. C.; FELICIO T. P.; SPONCHIADO J. C.; XAVIER, K. L.; MANTOVANI, A. Qualidade fisiológica e sanitária de sementes comerciais e salvas de soja (*Glycine max.*) produzidas na região do meio oeste de Santa Catarina. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 6, p. 7-12, 2022.

PESKE, S. T.; PESKE, F. B. **Reflexões sobre os avanços na produção de sementes**. Seed News, [S. l.], 2 mar. 2024. Disponível em: <https://seednews.com.br/artigos/4416-reflexoes-sobre-os-avancos-na-producao-de-sementes-edicao-marco-2024>. Acesso em: 13 fev. 2026.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 09 jul. 2025.

RADCHUK, V.; BORISJUK, L. Physical, metabolic and developmental functions of the seed coat. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. 1 p. 1-17, 2014.

ROSA, C. O.; SILVA, F. A.; CRUZ, D. R. C.; SANTOS, S. G. F. Importância da secagem e armazenamento adequados na manutenção da qualidade de sementes de pimenta (*Capsicum*). **Research, Society and Development**, v.12, p.1-14, 2023.

SALEEM, A.; MUYLLE, H.; APER, J.; RUTTINK, T.; WANG, J.; YU, D.; ROLDÁN-RUIZ, I. A genome-wide genetic diversity scan reveals multiple signatures of selection in a European soybean collection compared to Chinese collections of wild and cultivated soybean accessions. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, e631767, 2021.

- SARATH, K. L. L.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; MASETTO, T. E.; OBA, G. C. Physiological potential of peanut seeds submitted to drying and storage. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 3, p. 233-240, 2016.
- SCARIOT, M. A.; PASINATO, R.; GALON, L.; GOMES, C. B.; DIONELLO, R. G.; RADÜNZ, L. L. Immediate and latent damages of drying temperature in the quality of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) seeds. **Agromía Colombiana**, v. 38, n. 2, p. 226-233, 2020.
- SILVA, I. L.; CAMARGO, F. R. T. de; SOUZA, R. T. G. de; TEIXEIRA, I. R.; KIKUTI, H. Storage of soybean seeds treated with chemicals. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 6Supl2, p. 2961-2972, 2019.
- SILVA, M. A.; VIEIRA, R. D.; SANTOS, J. M. Influência do envelhecimento acelerado na anatomia da testa de sementes de soja, cv. Monsoy 8400. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 2, p.091-099, 2008.
- SILVÉRIO, S.; ANTUNES, A. M.; FERREIRA, R. B.; CUNHA, D. A.; DEVILLA, I. A.; CONCEIÇÃO, R. C. Physiological quality of soybean seeds in fixed-bed dryer with air radial distribution. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 10, p. 1668-1675, 2019.
- SOUZA, F. H. D.; MARCOS-FILHO, J. The seed coat as a modulator of seed-environment relationships in Fabaceae. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 4, p. 365-375, 2001.
- SOUZA, G. F. M. V.; AVENDAÑO, P. S.; FERREIRA, F. R. C.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A study on a novel system for soybean seeds drying: Performance and seed quality. **Drying Technology**, v. 40, n. 14, p. 2872–2879, 2022.
- TONI, J. R.; RADUNZ, L. L.; GALON, L.; DIONELLO, R. G. Quality assessment of soybean seeds submitted to industrial seed treatment and stored in a natural and controlled environment. **Journal of Stored Products Research**, v. 108, p. 1-7, 2024.
- ULLMANN, R.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; OLIVEIRA, D. E. C. de; COSTA, L. M. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 64-69, 2015.
- VERGARA, R. O.; CAPILHEIRA, A. F.; GADOTTI, G. I.; VILLELA, F. A. Intermittence periods in corn seed drying process. **Journal Of Seed Science**, v. 40, n. 2, p. 193-198, 2018.
- VIEIRA, D. R.; MARCOS, J. F. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B.; MARCOS-FILHO, J. (eds.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 2020. cap. 8, p. 333-379.

ZENG, L. W.; COCKS, P. S.; KAILLIS, S. G.; KUO, J. The role of fractures and lipids in the seed coat in the loss of hardseededness of six Mediterranean legume species. **Journal of Agricultural Science**, v. 143, n. 1, p. 43-55, 2005.

ZHANG, L.; JIA, R.; LIU, L.; SHEN, W.; FANG, Z.; ZHOU, B.; LIU, B. Seed coat colour and structure are related to the seed dormancy and overwintering ability of crop-to-wild hybrid soybean. **AoB PLANTS**, v. 15, n. 6, plad081, 2023.

CAPÍTULO 2

CINÉTICA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE SEMENTES DE SOJA ‘55I57 RSF’

CINÉTICA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE SEMENTES DE SOJA ‘55I57 RSF’

RESUMO

O Brasil, líder mundial na produção e exportação de soja, depende da produção de sementes de alta qualidade para sustentar elevados níveis de produtividade. Nesse contexto, a cultivar ‘55I57 RSF’, de alto potencial produtivo e ampla adoção na Região Sul, constitui material relevante para estudos relacionados à tecnologia de sementes e à engenharia de processos. A secagem é uma etapa crítica do pós-colheita, pois permite reduzir o teor de água das sementes a níveis seguros para o armazenamento, sem comprometer sua qualidade fisiológica, especialmente em cultivares precoces, como a ‘55I57 RSF’. O uso de modelos matemáticos para prever o processo de secagem possibilita descrever a dinâmica de remoção de água, definir condições operacionais adequadas, estimar o tempo de processo e o consumo energético e, consequentemente, aumentar a eficiência da operação e reduzir custos. Objetivou-se, com este estudo, determinar e modelar as curvas de secagem de sementes de soja ‘55I57 RSF’ nos regimes contínuo e intermitente, nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, bem como demonstrar a aplicabilidade operacional do modelo selecionado no contexto de uma unidade de beneficiamento de sementes, por meio de um cenário fictício. Para isso, sementes da safra 2023/24, colhidas com aproximadamente 18% de teor de água, foram submetidas à secagem contínua e intermitente em estufa de circulação de ar. Os modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis, Logarítmico, Newton e Page foram ajustados aos dados experimentais por regressão não linear e avaliados por meio do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE), da análise de resíduos e dos critérios AIC/BIC. O modelo de Page foi o que melhor descreveu as curvas de secagem, mostrando-se adequado para a previsão do tempo de secagem, o dimensionamento e a otimização de secadores. A aplicação fictícia do modelo em cenário de unidade de beneficiamento de sementes evidenciou sua utilidade operacional.

Palavras-chaves: Cinética de secagem. *Glycine max*. Modelos matemáticos.

ABSTRACT

Brazil, the world's leading producer and exporter of soybean, depends on the production of high-quality seeds to sustain high levels of productivity. In this context, the cultivar '55I57 RSF', which has high yield potential and is widely adopted in the South Region, represents relevant material for studies related to seed technology and process engineering. Drying is a critical postharvest step because it allows seed moisture content to be reduced to safe levels for storage without compromising physiological quality, especially in early-maturing cultivars such as '55I57 RSF'. The use of mathematical models to predict the drying process makes it possible to describe water removal dynamics, define suitable operational conditions, estimate process time and energy consumption, and consequently increase operational efficiency and reduce costs. This study aimed to determine and model the drying curves of '55I57 RSF' soybean seeds under continuous and intermittent drying regimes at 35, 38, 41, and 44 °C, as well as to demonstrate the operational applicability of the selected model in the context of a seed processing unit through a fictitious scenario. For this purpose, seeds from the 2023/24 growing season, harvested with approximately 18% moisture content, were subjected to continuous and intermittent drying in a forced-air circulation oven. The Diffusion Approximation, Two-Term, Two-Term Exponential, Henderson and Pabis, Logarithmic, Newton, and Page models were fitted to the experimental data by nonlinear regression and evaluated using the coefficient of determination (R^2), mean relative error (P), estimated mean error (SE), residual analysis, and AIC/BIC criteria. The Page model best described the drying curves and proved suitable for predicting drying time, sizing, and optimizing dryers. The fictitious application of the model in a seed processing unit scenario demonstrated its operational usefulness.

Keywords: Drying kinetics. *Glycine max*. Mathematical models.

1. INTRODUÇÃO

A soja é uma das culturas de maior relevância econômica e social no mundo, destacando-se pelo elevado teor de proteína e óleo e pelo papel estratégico na alimentação humana, na nutrição animal e na produção de biocombustíveis (ALI *et al.*, 2020). No Brasil, país que lidera a produção e a exportação mundial do grão (FAO, 2024), a obtenção de sementes de alta qualidade é condição essencial para assegurar elevados índices de produtividade a campo. Entre as cultivares de destaque, a soja ‘55I57 RSF’ apresenta elevado potencial produtivo e ampla adoção na região Sul (BRASMAX, 2024), o que a torna particularmente relevante para estudos voltados à tecnologia de sementes.

Após a colheita, a secagem constitui etapa crítica do processo produtivo, pois reduz o teor de água das sementes a níveis seguros para o armazenamento, minimizando os riscos de deterioração e perda de viabilidade (ANTUNES *et al.*, 2024). Entre os métodos utilizados, a secagem contínua promove a retirada constante de água, enquanto a intermitente intercala períodos de secagem e repouso, favorecendo a redistribuição hídrica no interior das sementes (GARCIA *et al.*, 2004). Assim, a definição adequada do regime de secagem e da temperatura do ar é fundamental para mitigar danos fisiológicos e preservar o potencial germinativo e o vigor.

Nesse contexto, a modelagem da cinética de secagem constitui uma ferramenta importante para descrever a dinâmica de remoção de água e auxiliar na otimização do processo. Modelos matemáticos como Newton, Henderson e Pabis, Logarítmico, Aproximação da Difusão e Page têm sido amplamente utilizados para representar curvas de secagem em diferentes espécies, como soja (OLIVEIRA *et al.*, 2014), amendoim (MABASSO *et al.*, 2025), girassol (NASCIMENTO *et al.*, 2018) e quinoa (KHAN *et al.*, 2025). A aplicação desses modelos permite estimar o tempo de secagem, simular condições operacionais e selecionar estratégias mais adequadas à espécie e à tecnologia empregada.

Além da descrição do processo, modelos bem ajustados subsidiam o dimensionamento, o aperfeiçoamento e a validação de secadores, contribuindo para maior eficiência operacional e redução do consumo energético (CARVALHO *et al.*, 2022; JOO *et al.*, 2024; SIQUEIRA *et al.*, 2020). Mais recentemente, abordagens de secagem inteligente têm ampliado o uso prático da modelagem ao integrar dados de cinética, sensores, algoritmos de inteligência artificial e sistemas de monitoramento em tempo real, possibilitando estimar o teor de água, ajustar condições operacionais e definir com maior precisão o ponto final de secagem (WANG *et al.*, 2025).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo determinar e modelar as curvas de secagem de sementes de soja ‘55I57 RSF’ em regimes contínuo e intermitente, nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, bem como demonstrar a aplicabilidade operacional do modelo selecionado no contexto de uma UBS, por meio de um cenário fictício.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Determinação experimental da cinética de secagem

O estudo foi conduzido no Laboratório de Pesquisa de Sementes da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. As sementes de soja ‘55I57 RSF’ foram produzidas na safra 2023/24 e colhidas no ponto de maturidade de campo, com teor de água de aproximadamente 18% (base úmida, b.u.). A colheita foi realizada manualmente, por arranquio das plantas, seguido de trilha em trilhadora elétrica (Vencedora B-150 PV), operada na velocidade mínima para reduzir danos mecânicos às sementes.

Após a trilha, as sementes foram encaminhadas ao laboratório, onde passaram por limpeza manual. Para padronização do tamanho, procedeu-se à classificação em peneiras, obtendo-se um lote homogêneo com diâmetro entre 6 e 7,5 mm.

As sementes foram submetidas a dois métodos de secagem: contínuo e intermitente. Na secagem contínua, utilizou-se estufa de circulação forçada, às temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, até que as sementes atingissem 12% de teor de água, valor considerado adequado para armazenamento em embalagens permeáveis. Para tanto, quatro repetições de aproximadamente 1,5 kg foram acondicionadas em sacos de náilon perfurados (56,0 × 48,0 cm), dispostos em camada única. O teor de água foi monitorado pelo método gravimétrico, por meio de pesagens periódicas em balança de precisão. Salienta-se que os valores de teor de água encontrados pelo método gravimétrico foram confirmados pelo método da estufa (BRASIL, 2025).

Na secagem intermitente, o processo foi interrompido quando as sementes atingiram aproximadamente 15% de teor de água e retomado após um período de repouso de três horas, até alcançar 12%. O repouso foi realizado em caixa de poliestireno expandido, totalmente selada, para simular condições de silo. A temperatura e a umidade relativa foram monitoradas por termo-higrômetro digital. A caixa possuía capacidade de 25 L e dimensões de 0,43 × 0,33 × 0,31 m, com espessura de 0,03 m. Essa metodologia foi adaptada de procedimentos descritos por MABASSO *et al.* (2023) e MABASSO *et al.* (2022) para secagem intermitente de grãos de milho.

O cálculo da razão do teor de água (RU) durante os processos de secagem foi realizado pela Eq. 1.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

RU - razão do teor de água, adimensional;

U - teor de água das sementes, kg de água kg⁻¹ de massa seca;

U_e - teor de água de equilíbrio das sementes, kg de água kg⁻¹ de massa seca; e,

U_i - teor inicial de água das sementes, kg de água kg⁻¹ de massa seca.

O modelo de Halsey Modificado foi utilizado para estimar o teor de água de equilíbrio das sementes em cada condição de secagem. Os valores obtidos foram de 9,59; 8,42; 7,53 e 6,53% para a secagem contínua e de 9,94; 8,64; 7,45 e 6,65% para a secagem intermitente, correspondentes às temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, respectivamente. As condições de umidade relativa do ar associadas foram de 53,4; 47,6; 42,6 e 35,7% na secagem contínua e de 55,2; 49,0; 42,0 e 36,7% na secagem intermitente. Esse modelo foi recomendado por ZEYMER *et al.* (2023) para a estimativa das curvas de equilíbrio higroscópico de sementes de soja.

2.2 Ajuste dos modelos

Sete modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais de razão de teor de água (MABASSO *et al.*, 2025; SANTOS *et al.*, 2024), representados na Tabela 1:

Tabela 1. Modelos de regressão não-linear utilizados para estimar o fenômeno de secagem das sementes de Soja ‘55I57 RSF’.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Aproximação da Difusão	$RU = a \exp (-k t) + (1 - a) \exp (-k b t)$	(2)
Dois Termos	$RU = a \exp (-k t) + b \exp (-c t)$	(3)
Exponencial Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + (1-a) \exp (-k a t)$	(4)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp (-k t)$	(5)
Logarítmico	$RU = a \exp (-k t) + b$	(6)
Newton	$RU = \exp (-k t)$	(7)
Page	$RU = \exp (-k t^n)$	(8)

RU - Razão de teor de água das sementes (adimensional); t - tempo de secagem (h); k - coeficiente de secagem; a, b, c e n - parâmetros dos modelos.

2.3 Seleção do melhor modelo

Na seleção dos melhores modelos, para representar a secagem das sementes de soja ‘55I57 RSF’, foram considerados a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), o erro médio relativo (P), o erro médio estimado (SE) e a distribuição dos resíduos. Os valores de SE e P foram calculados pelas Eq. 9 e Eq. 10, respectivamente.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (9)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (10)$$

Em que: N - número de observações experimentais; Y - razão de teor de água experimental; $\hat{Y}$ - razão de teor de água predito; GLR - grau de liberdade do modelo.

Para selecionar um único modelo que descrevesse de forma mais precisa o processo de secagem das sementes de soja ‘55I57 RSF’, foram utilizados critérios adicionais. Para os modelos que apresentaram os melhores ajustes de acordo com os critérios listados anteriormente, o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC) foram calculados, usando as Eqs. 11 e 12, respectivamente.

$$AIC = -2\loglike + 2p \quad (11)$$

$$BIC = -2\loglike + 2p \ln(n) \quad (12)$$

Em que:

p – número de parâmetros do modelo;

n – número total de observações;

loglike – valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

Para a escolha do melhor modelo matemático, foram considerados os seguintes critérios: valores de R^2 mais próximos da unidade, valores de P inferiores a 10%, erro médio estimado (SE) mais próximo de zero, distribuição aleatória dos resíduos e menores valores de AIC e BIC.

2.4 Aplicação do modelo em cenário de UBS (exemplo prático)

Para ilustrar o uso operacional do modelo selecionado, vislumbrou-se um lote de sementes de soja recebido com 18% de teor de água (b.u.), com o objetivo de secá-lo até 12%, empregando secagem contínua a 35 °C. As conversões de base úmida para base seca foram realizadas por meio da Eq. 13.

$$U_{b,s} = \frac{U_{b,u}}{1 - U_{b,u}} \quad (13)$$

$U_{b,s}$ – teor de água em base seca, decimal;

$U_{b,u}$ - teor de água em base úmida, decimal;

Calculou-se a razão do teor de água (RU) conforme a Eq. 1. Já o teor de água de equilíbrio foi estimado pelo modelo de Halsey modificado, admitindo umidade relativa média de 53% durante o processo. A Equação 14 apresenta o modelo de Halsey, com os coeficientes específicos para soja (ZEYMER *et al.*, 2023).

$$U_e = \left(\frac{\exp(3,4084 - 0,0109T)}{-\ln(UR)} \right)^{\frac{1}{1,5445}} \quad (14)$$

U_e – teor de água de equilíbrio em base seca, decimal;

T – Temperatura do ambiente de secagem, °C;

UR – Umidade relativa do ambiente de secagem, decimal.

Para estimar o tempo de secagem, empregou-se o modelo que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, conforme a metodologia descrita na seção anterior.

Assumiu-se que a secagem foi realizada em secador com camada delgada e ausência de limitações externas à transferência de massa e energia, com finalidade didática e de dimensionamento preliminar.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação experimental da cinética de secagem

O teor de água das sementes de soja ‘55I57 RSF’ foi reduzido de 0,23 para 0,14 base seca (b.s.) nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, tanto na secagem contínua quanto na intermitente (Figura 1). Os tempos efetivos para atingir esse teor foram de aproximadamente 14, 11, 8 e 7 horas, respectivamente, em ambos os métodos (desconsiderando o período de repouso na intermitência). Observou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem acelerou a remoção de água, em razão do maior gradiente de potencial hídrico entre a semente e o ar (GARCIA-LLOBODANIN & BILLIRIS, 2023; RODOVALHO *et al.*, 2015).

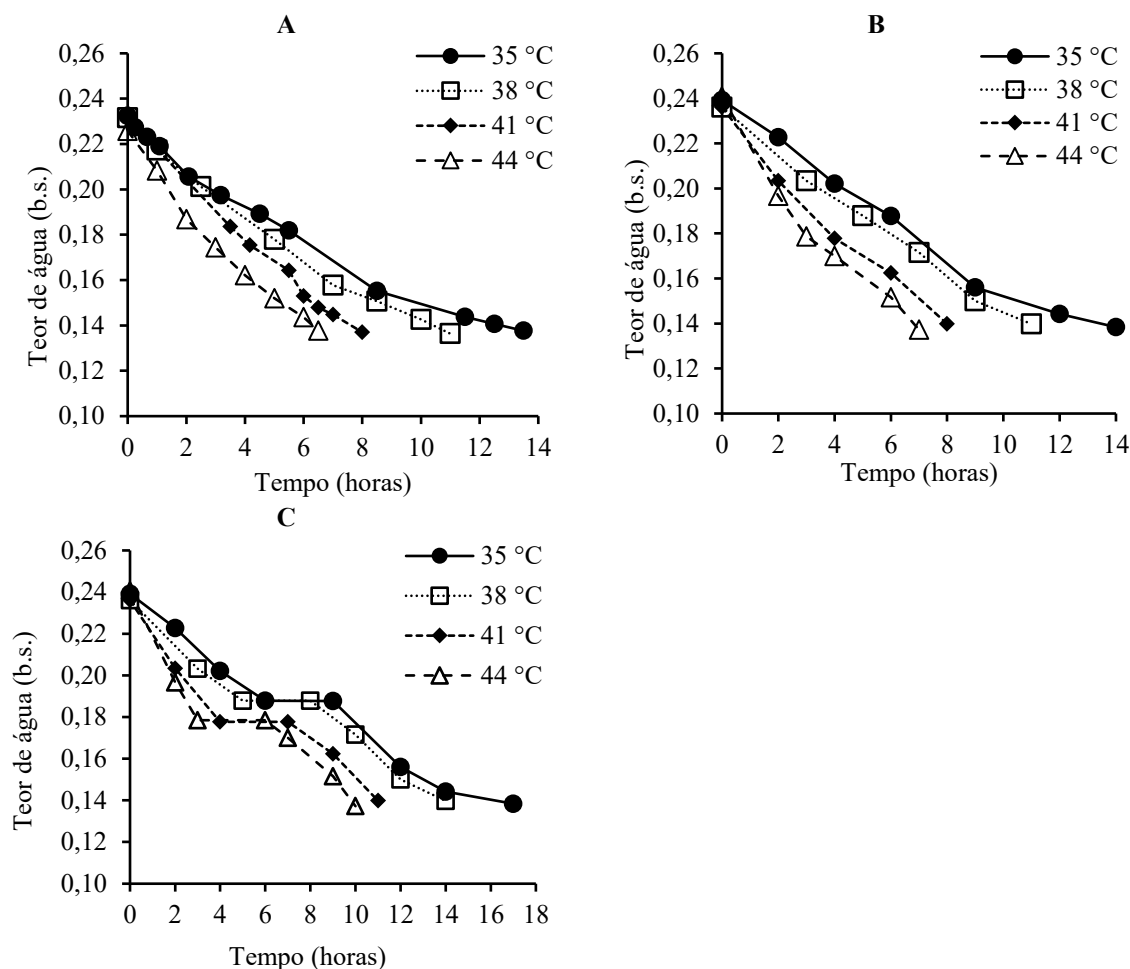


Figura 1. Teor de água em função do tempo de secagem pelo método contínuo (A), pelo método intermitente considerando o tempo efetivo de secagem (B) e pelo método intermitente considerando o tempo de repouso (C), para sementes de soja ‘55I57 RSF’.

Não foram observadas melhorias no processo de secagem (redução do tempo ou variação do teor de água) com a aplicação da intermitência (Figura 1C). Dessa forma, para a modelagem, considerou-se apenas o tempo efetivo de secagem (Figura 1B).

3.2 Seleção do melhor modelo

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) e da distribuição dos resíduos para os diferentes modelos matemáticos ajustados. Verifica-se que todos os modelos apresentaram R^2 superior a 0,98. No entanto, esse critério, isoladamente, não é suficiente para a seleção adequada de modelos não lineares (CORRÊA FILHO *et al.*, 2015), sendo necessária a utilização de outros indicadores estatísticos.

Tabela 2. Coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE, decimal) e distribuição residual para os modelos ajustados aos dados experimentais de secagem contínua de sementes de soja ‘55I57 RSF’

Modelo	(°C)	R^2	P (%)	SE (decimal)	Distribuição
Aproximação da Difusão	35	0,996	2,168	0,0177	A
	38	0,998	1,123	0,0107	A
	41	0,996	1,611	0,0144	A
	44	0,998	0,819	0,0100	A
Dois termos	35	0,996	1,953	0,0176	A
	38	0,998	1,125	0,0119	A
	41	0,996	1,617	0,0161	A
	44	0,998	0,868	0,0109	A
Exponencial de dois termos	35	0,996	1,995	0,0166	A
	38	0,998	1,128	0,0097	A
	41	0,991	2,749	0,0190	T
	44	0,998	0,799	0,0091	A
Henderson e Pabis	35	0,996	1,951	0,0157	A
	38	0,998	1,139	0,0097	A
	41	0,992	2,683	0,0184	T
	44	0,996	1,268	0,0119	A
Logaritmo	35	0,996	1,964	0,0166	A
	38	0,998	1,128	0,0106	A
	41	0,996	1,626	0,0145	A
	44	0,998	0,893	0,0098	A
Newton	35	0,996	2,168	0,0160	A
	38	0,998	1,128	0,0090	A
	41	0,991	2,749	0,0176	T
	44	0,996	1,291	0,0114	A
Page	35	0,996	1,897	0,0163	A
	38	0,998	1,125	0,0097	A
	41	0,996	1,498	0,0130	A
	44	0,997	0,871	0,0100	A

A – Distribuição aleatória; T – Distribuição tendenciosa.

Tabela 3. Coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE, decimal) e distribuição residual para os modelos ajustados aos dados experimentais de secagem intermitente de sementes de soja ‘55I57 RSF’

Modelo	(°C)	R^2	P (%)	SE (decimal)	Distribuição
Aproximação da Difusão	35	0,994	3,054	0,0248	A
	38	0,995	2,027	0,0203	A
	41	0,995	1,959	0,0208	A
	44	0,996	1,934	0,0169	A
Dois termos	35	0,994	3,217	0,0308	A
	38	0,996	2,213	0,0226	A
	41	0,995	1,989	0,0293	A
	44	0,995	1,937	0,0207	A
Exponencial de dois termos	35	0,993	3,504	0,0241	A
	38	0,987	4,222	0,0295	T
	41	0,995	1,959	0,0170	A
	44	0,995	2,093	0,0156	A
Henderson e Pabis	35	0,987	4,612	0,0346	T
	38	0,988	4,026	0,0281	T
	41	0,995	1,989	0,0169	A
	44	0,990	2,424	0,0235	A
Logaritmo	35	0,990	4,500	0,0328	T
	38	0,996	2,215	0,0185	A
	41	0,996	1,986	0,0205	A
	44	0,994	2,321	0,0198	A
Newton	35	0,983	5,603	0,0362	T
	38	0,987	4,222	0,0264	T
	41	0,995	1,959	0,0147	A
	44	0,988	2,663	0,0229	T
Page	35	0,993	3,391	0,0240	A
	38	0,995	2,147	0,0186	A
	41	0,995	1,935	0,0169	A
	44	0,995	2,005	0,0151	A

A – Distribuição aleatória; T – Distribuição tendenciosa.

Para que um modelo seja considerado adequado na representação de determinado fenômeno, é necessário que apresente erro médio relativo (P) inferior a 10% (MOHAPATRA & RAO, 2005), além de valores de erro médio estimado (SE) tão próximos de zero quanto possível (KHAN *et al.*, 2025). Todos os modelos avaliados apresentaram valores de P inferiores a 10% e baixos valores de SE, indicando bom ajuste geral aos dados experimentais. No entanto, como os valores de SE foram reduzidos e relativamente próximos entre os modelos, esse critério, isoladamente, não foi suficiente para discriminá-los de forma clara, sendo necessária a avaliação conjunta da distribuição dos resíduos e dos demais critérios de seleção (Tabelas 2 e 3).

No que se refere à distribuição dos resíduos, apenas os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos e Page apresentaram comportamento aleatório em todas as temperaturas e em ambos os métodos de secagem, como evidenciado nas Tabelas 2 e 3. Ressalta-se que um modelo é considerado aceitável quando os resíduos se distribuem de forma aleatória em torno de uma linha horizontal próxima de zero (Figura 2). Por outro lado, quando os resíduos formam figuras geométricas, revelam regiões de superestimação ou subestimação em relação à condição real ou tendem a se concentrar em pontos fora do eixo, a distribuição é considerada tendenciosa, tornando o modelo inadequado para representar o fenômeno em questão (CORRÊA *et al.*, 2014).

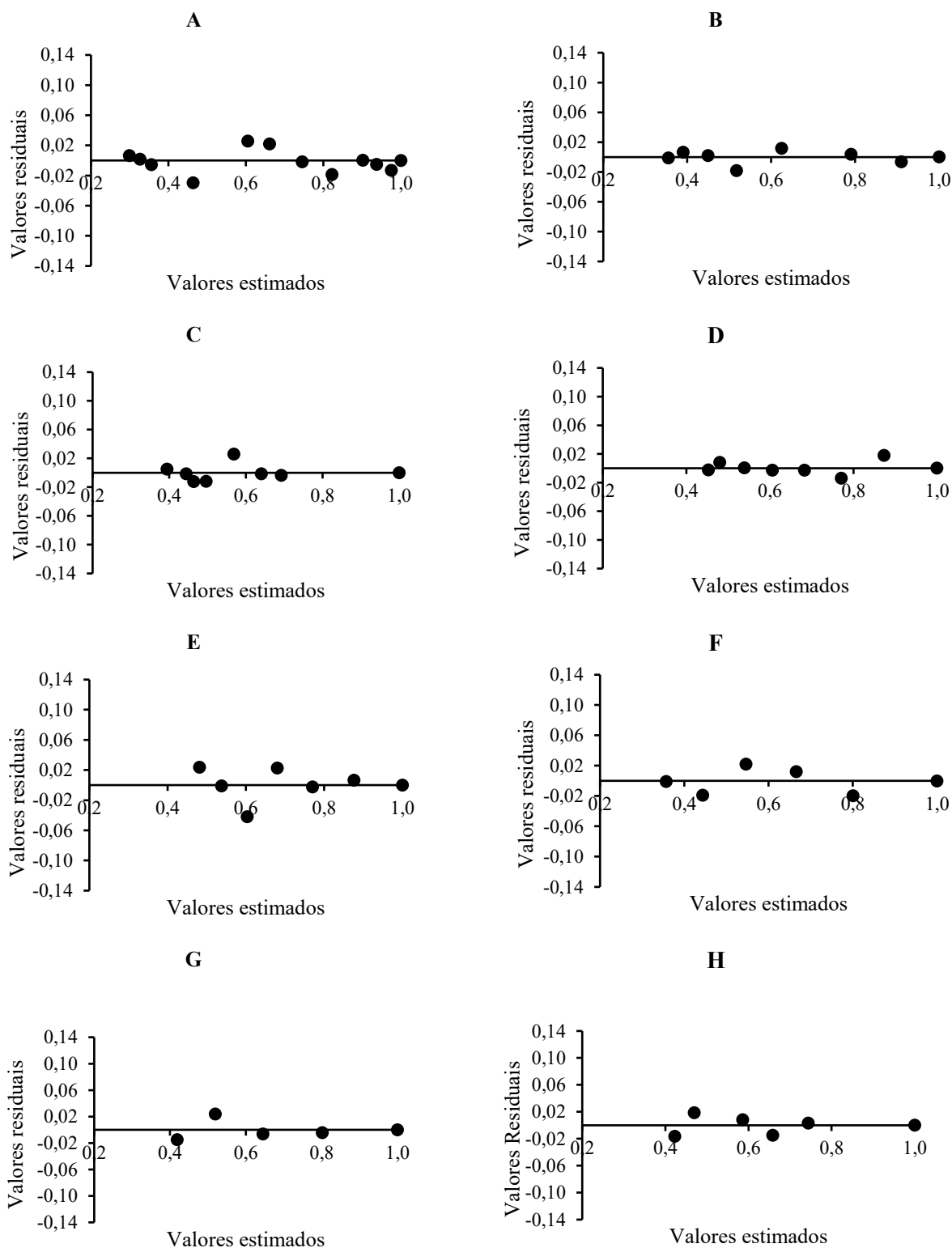


Figura 2. Distribuição aleatória dos resíduos do modelo de Page para sementes de soja '55I57 RSF' submetidas à secagem contínua a 35 °C (A), 38 °C (B), 41 °C (C) e 44 °C (D), e à secagem intermitente a 35 °C (E), 38 °C (F), 41 °C (G) e 44 °C (H).

Para a seleção de um único modelo, foram utilizados o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC), sendo que menores valores desses critérios indicam melhor ajuste do modelo aos dados experimentais (FERREIRA JUNIOR *et al.*, 2020). Entre os modelos avaliados, o modelo de Page apresentou, de modo geral, os menores valores de AIC e BIC nas condições de secagem contínua e intermitente (Tabelas 4 e 5). Na secagem intermitente a 38 °C, o modelo de Dois Termos apresentou valor de BIC ligeiramente inferior ao de Page, enquanto o Page apresentou menor valor de AIC. Considerando conjuntamente os critérios de informação e os demais parâmetros utilizados na avaliação dos modelos, o modelo de Page apresentou o melhor desempenho global, sendo selecionado para representar a cinética de secagem das sementes de soja ‘55I57 RSF’.

Tabela 4. Valores dos critérios de informação AIC e BIC obtidos para os modelos Aproximação da difusão, Dois Termos e Page para as diferentes temperaturas utilizadas na secagem contínua em sementes de soja ‘55I57 RSF’.

Modelo	(°C)	AIC	BIC
Aproximação da Difusão	35	-96,2599	-95,2901
	38	-70,4208	-70,1825
	41	-65,5708	-65,3324
	44	-71,5202	-71,2819
Dois Termos	35	-95,8294	-94,3747
	38	-70,4598	-70,2215
	41	-65,5744	-65,3360
	44	-71,8563	-71,6180
Page	35	-97,0407	-96,0709
	38	-72,4208	-72,2619
	41	-67,8452	-67,6863
	44	-71,9868	-71,8279

Tabela 5. Valores dos critérios de informação AIC e BIC obtidos para os modelos Aproximação da difusão, Dois Termos e Page para as diferentes temperaturas utilizadas na secagem intermitente em sementes de soja ‘55I57 RSF’.

Modelo	(°C)	AIC	BIC
Aproximação da Difusão	35	-49,6680	-49,8303
	38	-44,9293	-45,5540
	41	-37,3081	-38,4797
	44	-47,1439	-47,7686
Dois Termos	35	-46,6600	-46,8764
	38	-46,0679	-46,6926
	41	-37,3568	-38,5285
	44	-47,1441	-47,7688
Page	35	-50,5974	-50,7055
	38	-46,2648	-46,6813
	41	-39,3624	-40,1436
	44	-48,7119	-49,7119

Os coeficientes do modelo de Page ajustados para ambas as condições de secagem mostraram-se significativos a 5% de probabilidade pelo teste t (Tabelas 6 e 7). Na secagem intermitente (Tabela 7), observa-se que o aumento da temperatura promoveu elevação progressiva do coeficiente “k”, acompanhada de redução do coeficiente “n”. Para a secagem contínua, entretanto, não se observou um padrão definido para esses parâmetros (Tabela 6).

Tabela 6. Coeficientes dos modelos ajustados para as temperaturas do ar de secagem no método contínuo das sementes de soja ‘55I57 RSF’.

Modelo	T °C	Coeficientes do modelo	
		k	n
Page	35	0,0957 *	0,9736 *
	38	0,0939 *	1,0012 *
	41	0,0848 *	1,1579 *
	44	0,1353 *	0,9436 *

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Tabela 7. Parâmetros dos modelos ajustados para as temperaturas do ar de secagem no método intermitente das sementes de soja ‘55I57 RSF’.

Modelo	T °C	Parâmetros do modelo	
		k	n
Page	35	0,0579 *	1,1973 *
	38	0,0609 *	1,1790 *
	41	0,1160 *	0,9873 *
	44	0,1640 *	0,8527 *

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

De acordo com ARAÚJO *et al.* (2017), o parâmetro “k” tende a aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem, uma vez que temperaturas mais altas promovem maiores taxas de remoção de água, permitindo que o produto atinja o teor de equilíbrio em menor tempo de exposição. Essa constante de secagem está diretamente relacionada à difusividade efetiva no período de taxa decrescente, no qual o mecanismo predominante de remoção de água é a difusão líquida (BABALIS & BELESSIOTIS, 2004)). Por outro lado, a ausência de um padrão definido para o coeficiente “n” na secagem contínua e sua redução na secagem intermitente podem indicar que as condições externas do ambiente de secagem influenciaram a perda de umidade das sementes. Alternativamente, essa variação pode estar associada ao caráter empírico do parâmetro, que funciona como expoente de ajuste responsável por corrigir a curvatura da curva de secagem.

A Figura 3 apresenta a relação entre a razão de teor de água (RU) obtida experimentalmente e aquela estimada pelo modelo de Page para as secagens contínua e intermitente. Nota-se que os valores experimentais se distribuem próximos à reta de ajuste, devido à proximidade dos dados observados à linha de 45°, o que demonstra a elevada concordância entre os dados observados e os estimados, evidenciando a precisão do modelo.

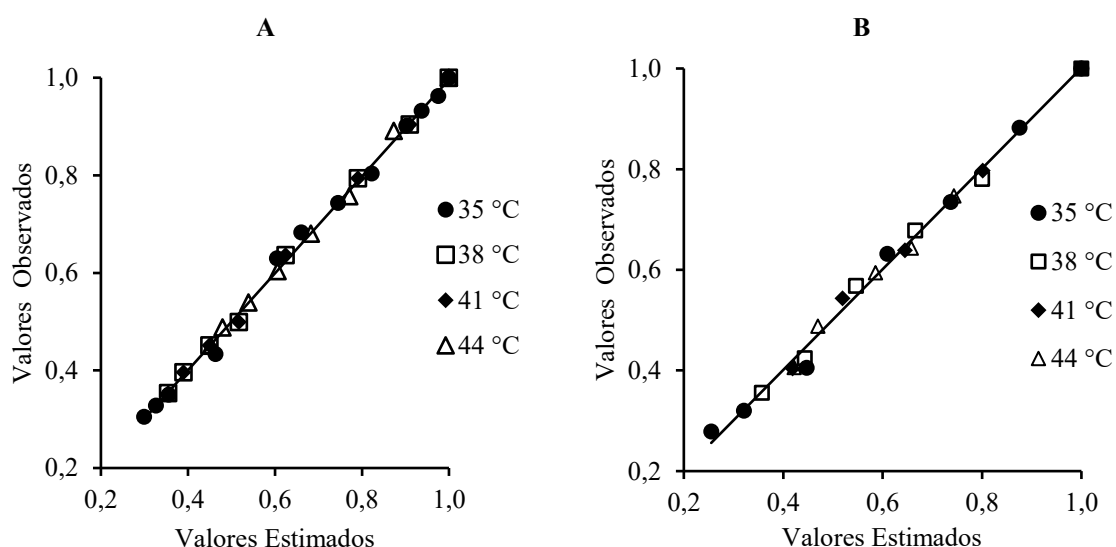


Figura 3. Valores estimados e observados da razão do teor de água pelo modelo de Page para sementes de soja ‘55I57 RSF’ submetidas a secagem contínua (A) e secagem intermitente (B).

As curvas de secagem das sementes de soja ‘55I57 RSF’, nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, bem como os valores estimados pelo modelo de Page, são apresentadas na Figura 4. Observa-se que os valores da razão de teor de água para as temperaturas de 35 e 38 °C foram muito próximos, principalmente durante a secagem intermitente, assim como a eficácia do modelo de Page em representar o fenômeno. Este modelo é amplamente utilizado para descrever a cinética de secagem de sementes e grãos, como em soja (OLIVEIRA *et al.*, 2014), sementes de girassol descascadas (NASCIMENTO *et al.*, 2018), sementes de quinoa (KHAN *et al.*, 2025) e sementes de pinhão-mansão (RESENDE *et al.*, 2011).

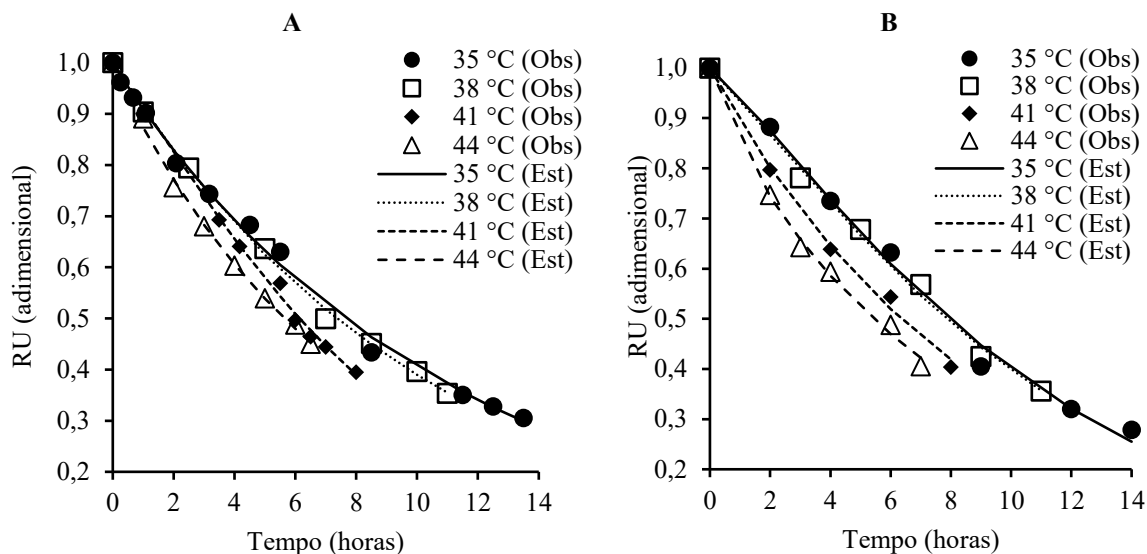


Figura 4. Valores experimentais e estimados pelo modelo de Page para a razão de teor de água em função do tempo de secagem das sementes de soja ‘55I57 RSF’, submetidas à secagem contínua (A) e intermitente (B).

3.3 Aplicação do modelo em cenário de UBS (exemplo prático)

Considerando um lote de sementes de soja recebido em uma UBS com teor de água inicial de 18% (b.u.) e com meta de redução para 12% (b.u.), adotou-se secagem contínua a 35 °C. Primeiramente, é necessário converter ambos os teores de água para base seca (b.s.) antes dos cálculos e do dimensionamento do processo.

$$U_{b.s.} = \frac{0,18}{1-0,18} = U_{b.s.} = 0,2195 \text{ decimal (b.s.)}$$

$$U_{b.s.} = \frac{0,12}{1-0,12} = U_{b.s.} = 0,1363 \text{ decimal (b.s.)}$$

O teor de água de equilíbrio foi estimado pelo modelo de Halsey modificado, admitindo umidade relativa média de 53% durante o processo:

$$U_e = \left(\frac{\exp(3,4084 - 0,0109T)}{-\ln(0,53)} \right)^{\frac{1}{1,5445}} \quad U_e = 0,0959 \text{ decimal (b.s.)}$$

Em termos práticos, o teor de água de equilíbrio corresponde ao menor teor de água alcançável sob umidade relativa de 53% e temperatura de secagem de 35 °C.

Agora é possível calcular a razão de teor de água (RU) desejada no final do processo de secagem que corresponde ao teor de água de 12%:

$$RU = \frac{0,1363 - 0,0959}{0,2195 - 0,0959} \quad RU = 0,3268 \text{ (adimensional)}$$

De posse da razão do teor de água (RU), aplica-se o modelo de Page (Eq. 8), selecionado para a predição das curvas de secagem das sementes de soja ‘55I57 RSF’, a fim de estimar o tempo necessário para alcançar esse valor. Devem ser utilizados os coeficientes ajustados especificamente para a secagem a 35 °C.

$$RU = \exp(-0,0957(t^{0,9736}))$$

Para fins didáticos, isolou-se a variável ‘t’ (tempo de secagem em horas):

$$t = \left(\frac{-\ln(RU)}{0,0957} \right)^{\frac{1}{0,9736}}$$

Adicionando o valor de RU desejado (0,3268) na equação:

$$t = \left(\frac{-\ln(0,3268)}{0,0957} \right)^{\frac{1}{0,9736}}$$

$t = 12,49$ horas ou 12 horas e 29 minutos.

A capacidade de uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS) de estimar rotineiramente a cinética de secagem, por exemplo, a partir do modelo de Page, gera ganhos operacionais diretos. As previsões de tempo de residência por lote organizam filas e janelas de recebimento, reduzindo gargalos; orientam o uso do secador (carga e sequência de bateladas) para maximizar a produtividade sem comprometer a qualidade fisiológica. Também balizam a capacidade diária de processamento, com impacto na logística interna e no transporte. Além disso, antecipam consumo energético e custos por lote, permitindo ajustar turnos, mitigar picos de demanda e otimizar a alocação de recursos. No cenário exemplificado (Figura 5), a aplicação do modelo resultou em tempo estimado de secagem de ~12,49 horas (≈ 12 h 30 min),

informação crucial para o dimensionamento operacional e a programação de recebimento e secagem ao longo do dia.

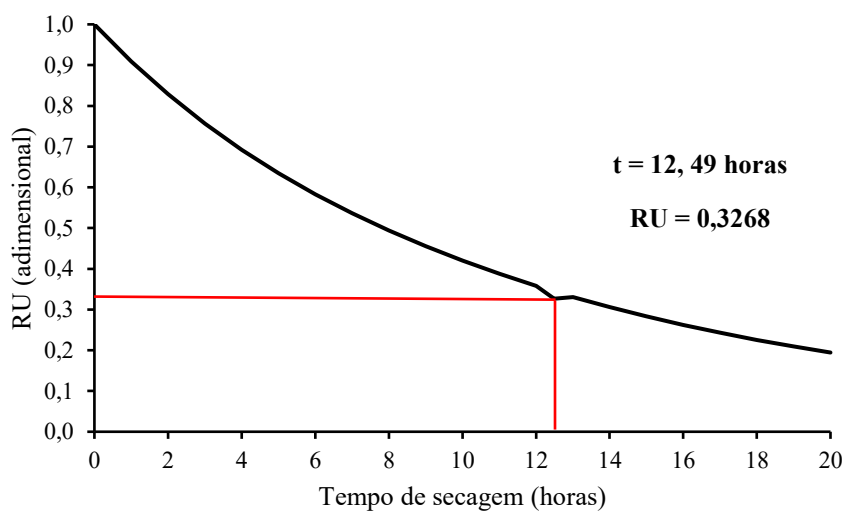


Figura 5. Curva de cinética de secagem (modelo de Page; $k = 0,0957$; $n = 0,9736$) para sementes de soja '55I57 RSF' a 35 °C, mostrando a variação da razão do teor de água (RU) em função do tempo. As linhas vermelhas indicam o tempo estimado para atingir $RU = 0,3268$ ($t \approx 12,49$ h).

CONCLUSÃO

A secagem de sementes de soja '55I57 RSF' nas temperaturas de 35, 38, 41 e 44 °C, tanto em regime contínuo quanto intermitente, foi melhor representada pelo modelo de Page.

A aplicação fictícia do modelo de Page em cenário de UBS evidenciou sua utilidade operacional com o objetivo de otimizar o processo de secagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa com sementes de soja ‘55I57 RSF’, verificou-se que a secagem é determinante para preservar a qualidade fisiológica e assegurar o potencial de armazenamento. A secagem contínua a 35 °C mostrou-se consistentemente superior, mantendo a germinação e o vigor por até nove meses, enquanto temperaturas mais elevadas (44 °C) aceleraram a perda de qualidade e induziram fissuras superficiais do tegumento; regimes intermitentes, sobretudo em faixas mais baixas de temperatura, foram menos favoráveis ao vigor.

Do ponto de vista anatômico, a espessura e a organização interna das camadas do tegumento (paliçádicas e em ampulheta) não apresentaram alterações mensuráveis atribuíveis aos métodos e temperaturas de secagem, sugerindo que os danos observados sob condições térmicas mais severas se concentram na superfície, sem impactar a arquitetura interna do revestimento da semente.

No âmbito da modelagem, o ajuste comparativo de modelos cinéticos indicou o modelo de Page como a melhor representação das curvas de secagem para sementes de soja ‘55I57 RSF’. Essa escolha—embasada em R^2 , P, SE, avaliação de resíduos e critérios AIC/BIC—habilita o uso prático do modelo para prever tempos de processo, dimensionar e aperfeiçoar secadores e delimitar janelas operacionais em função do teor-alvo de água.

Em síntese, os resultados indicam que: (i) deve-se priorizar a secagem contínua em condições amenas (em torno de 35 °C) para garantir a manutenção da qualidade fisiológica das sementes de soja ‘55I57 RSF’; (ii) evitar exposições prolongadas a 44 °C, que aumentam o risco de danos superficiais e perdas de vigor; e (iii) empregar o modelo de Page como ferramenta preditiva no planejamento operacional. Para pesquisas futuras, recomenda-se validar esses parâmetros em escala piloto/industrial, com diferentes vazões de ar e secagem intermitente explorando maior número de ciclos e distintas relações de aquecimento/repouso; além disso, avaliar secagens iniciadas em teores de água mais elevados (22–25%), à luz de avanços tecnológicos em colhedoras que tendem a permitir colheitas com grau de umidade das sementes mais alto, mais próximos da maturidade fisiológica.

REFERÊNCIAS

- ALI, W.; AHMAD, M. M.; IFTIKHAR, F.; QURESHI, M.; CEYHAN, A. Nutritive potentials of soybean and its significance for humans health and animal production: a review. **Eurasian Journal of Food Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 41-53, 2020.
- ANTUNES, A. M.; CORRÊA, J. L. G.; CARVALHO, E. R. Drying of soybean seeds and its influence on quality: a review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 18, n. 5, p. 272-279, 2024.
- ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTMANN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.
- BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying condition on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 3, p. 449-458, 2004.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Capítulo 13 – Determinação do grau de umidade (rev. 1)**. In: BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Regras para Análise de Sementes (RAS) – WikiSDA*, 2025. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RAS_2025/ras_2024_umidade. Acesso em: 25 dez. 2025.
- BRASMAX. **Brasmax Zeus IPRO: O poder do máximo rendimento de soja**. 2024. Disponível em: <https://www.brasmaxgenetica.com.br/blog/brasmax-zeus/>. Acesso em: 06 jul. 2024.
- CARVALHO, M. S.; CORRÊA, P. C.; SILVA, G. N.; LOPES, L. M.; SOUSA, A. H. D. Kinetics and mathematical modeling of the drying process of macaúba almonds. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 199–205, 2022.
- CORRÊA FILHO, L. C.; ANDRADE, E. T. D.; MARTINAZZO, A. P.; ANDREA, E. M.; SOUSA, F. A. D.; FIGUEIRA, V. G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 797-802, 2015.
- CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. C. C.; GONELI, A. L. D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1047-1052, 2014.

- FAO. **FAOSTAT: Production: Crops and livestock products**. 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: set. 2025.
- FERREIRA JUNIOR, W. N.; RESENDE, O.; PINHEIRO, G. K.; SILVA, L. C. M.; COSTA, E. R. Use of AIC and BIC in desorption isotherms of tamarind seeds (*Tamarindus indica* L.). **Engenharia Agrícola**, v.40, p.511-517, 2020.
- GARCIA, D. C.; BARRO, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.603-608, 2004.
- GARCIA-LLOBODANIN, L.; BILLIRIS, A. Effect of the drying air conditions on the drying rate and milling quality of a long-grain rice variety. **Food Science and Technology**, v. 43, n. 1, p. 1-7, 2023.
- JOO, Y.; CHANG, S.; KIM, S.; OH, S. Effect of drying kinetics model on energy efficiency of drying systems. **Energy**, v. 291, 130390, 2024.
- KHAN, J.; GUL, P.; LI, Q.; LIU, K. Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 117, p. 1-22, 2025.
- MABASSO, G. A.; RESENDE, O.; AMADE, F. F.; SIQUEIRA, V. C.; SOUZA, D. G. Drying kinetics and thermodynamic properties of peanut seeds (*Arachis hypogaea* L.). **Food Science and Technology (Campinas)**, v. 45, p. 1-9, 2025.
- MABASSO, G. A.; SIQUEIRA, V. C.; QUEQUETO, W. D.; RESENDE, O.; SCHOENINGER, V.; MARTINS, E. A. S.; ISQUIERDO, E. P. Microscopy of maize grains subjected to continuous and intermittent drying. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 44, p. 1-9, 2022.
- MABASSO, G. A.; SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; QUEQUETO, W. D.; SCHOENINGER, V.; SIMEONE, M. L. F.; MARTINS, E. A. S.; CRIPPA, D. S. The effect of intermittent drying with variable resting times on quality parameters of corn obtained after storage. **Lwt**, v. 182, p. 1-8, 2023.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- NASCIMENTO, A. P. S.; BARROS, S. L.; SANTOS, N. C.; ARAÚJO, A. J. B.; CAVALCANTI, A. S. R. R. M.; DUARTE, M. E. M. Secagem convectiva e influência da temperatura nas propriedades físico-químicas das amêndoas de girassol comercial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 20, n. 3, p. 227-238, 2018.

- OLIVEIRA, D. E. C. de; RESENDE, O.; BESSA, J. F. V.; KESTER, A. N.; SMANIOTTO, T. A. S. Mathematical modeling and thermodynamic properties for drying soybean grains. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 1, p. 31-38, 2014.
- RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.
- RODOVALHO, R. S.; SILVA, H. W.; SILVA, I. L.; ROSSETTO, C. A. V. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. **Global Science and Technology**, v. 8, n. 2, p. 128-142, 2015.
- SANTOS, S. G. F.; PAULA, D. F.; SOUZA, A. M. B.; SILVA, I. J.; COELHO, A. P. F.; SILVA, L. J.; DIAS, D. C. F. S.; ARAUJO, E. F. Drying kinetics and physiological quality of *Solanum aethiopicum* seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 11, p. 1-7, 2024.
- SIQUEIRA, V. C.; LEITE, R. A.; MABASSO, G. A.; MARTINS, E. A. S.; QUEQUETO, W. D.; ISQUIERDO, E. P. Drying kinetics and effective diffusion of buckwheat grains. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. 1-9, 2020.
- WANG, Z.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S.; LIN, J.; YU, D. AI technology in smart drying of foods: A critical review of research and applications. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 103, 104052, 2025.
- ZEYMER, J. S.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ARAUJO, M. E. V.; GUZZO, F.; BAPTESTINI, F. M. Moisture sorption isotherms and hysteresis of soybean grains. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, p. 1-11, e56615, 2023.