



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA

LUCAS VINICIOS ROCHA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À CINÉTICA DE
SECAGEM DE SEMENTES DE DIFERENTES VARIEDADES DE MELÃO
(*Cucumis Melo* L.)

PAU DOS FERROS-RN
2026

LUCAS VINICIOS ROCHA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À CINÉTICA DE
SECAGEM DE SEMENTES DE DIFERENTES VARIEDADES DE MELÃO
(*Cucumis Melo* L.)**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: José Mariano da Silva Neto,
Prof. Dr.

PAU DOS FERROS
2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237a Santos, Lucas Vinícios Rocha dos.
Avaliação de modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem de sementes de diferentes variedades de melão (*Cucumis melo* L.) / Lucas Vinícios Rocha dos Santos. - 2026.
46 f. : il.

Orientador: José Mariano da Silva Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2026.

1. Cinética de secagem. 2. Sementes de melão.
3. Modelagem matemática. 4. Page. 5. Henderson & Pabis. I. Silva Neto, José Mariano da, orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LUCAS VINICIOS ROCHA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À CINÉTICA DE
SECAGEM DE SEMENTES DE DIFERENTES VARIEDADES DE MELÃO
(*Cucumis Melo* L.)**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia.

Defendida em: 02 / 07 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

José Mariano da Silva Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente e Orientador

Shirlene Kelly Santos Carmo, Profa. Dr^a. (UFERSA)
Membro Examinador

Raissa dos Navegantes da Silva, Ma. (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre foram minha base, meu apoio e minha maior fonte de incentivo. A vocês, que estiveram presentes em cada etapa da minha caminhada, oferecendo amor, cuidado e força nos momentos mais difíceis, deixo minha mais sincera gratidão. Esta conquista também pertence a vocês, pois cada esforço, cada palavra de encorajamento e cada gesto de dedicação foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. (*Presentes*)

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha gratidão por ter conduzido minha caminhada até aqui, concedendo-me força, discernimento e perseverança para superar os desafios encontrados durante a vida acadêmica.

Aos meus pais, Darlan Gomes Oliveira dos Santos e Maria Jucileide de Souza Rocha, agradeço profundamente por todo amor, cuidado e incentivo. Foram vocês que, com dedicação e esforço, contribuíram para que eu pudesse seguir em frente, acreditando sempre na importância da educação e na realização dos meus objetivos.

À minha namorada, Valéria Lourenço de Lima, agradeço pelo apoio constante, pela paciência e pela presença nos momentos mais importantes dessa trajetória. Seu companheirismo tornou essa caminhada mais leve e significativa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Mariano da Silva Neto, registro minha gratidão pela orientação, pelos ensinamentos compartilhados e pelas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua disponibilidade e direcionamento foram essenciais para a construção desta pesquisa.

A banca examinadora, pelas ponderações e contribuições fundamentais para o melhoramento deste trabalho.

Aos amigos que estiveram presentes ao longo dessa etapa, deixo meu agradecimento pelo incentivo, pelas palavras de apoio e pela colaboração, direta ou indireta, durante esse percurso.

Por fim, agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), por ter proporcionado experiências, aprendizados e oportunidades que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

RESUMO

A secagem de sementes constitui uma etapa fundamental para a conservação, armazenamento e valorização de produtos agrícolas, uma vez que a redução controlada do teor de umidade minimiza processos de deterioração microbiológica e bioquímica, contribuindo para a manutenção da qualidade do material. Nesse contexto, as sementes de melão das variedades Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo apresentam potencial para diferentes aplicações, porém ainda são escassos os estudos relacionados à sua cinética de secagem e à modelagem matemática desse processo. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem dessas sementes, identificando aquele que melhor representa a remoção de umidade ao longo do tempo. As sementes foram obtidas, higienizadas, acondicionadas em cadinhos previamente identificados e submetidas à secagem convectiva em estufa com circulação e renovação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. A partir dos dados experimentais de massa, foi determinada a razão de umidade e ajustados os modelos matemáticos de Henderson & Pabis e Page. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2), da soma dos quadrados dos erros (SSE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Os resultados evidenciaram redução contínua da razão de umidade para todas as variedades estudadas, sendo observada maior taxa de secagem com o aumento da temperatura. Os tempos aproximados para atingir o equilíbrio higroscópico foram de 320, 280 e 180–200 min para as sementes de Cantaloupe; 340, 260 e 220 min para as sementes de Gália; e 340, 280 e 240 min para as sementes de Pele de Sapo, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. As sementes de melão Cantaloupe apresentaram menor tempo para atingir o equilíbrio, indicando maior velocidade de secagem em comparação às demais variedades. Entre os modelos avaliados, o modelo de Page apresentou os melhores ajustes estatísticos, com coeficientes de determinação variando de 0,9939 a 0,9985 e menores valores de SSE e RMSE, demonstrando maior capacidade de descrever o comportamento não linear da secagem. Conclui-se que o modelo de Page é o mais adequado para representar a cinética de secagem das sementes de melão estudadas, fornecendo informações relevantes para a otimização e o dimensionamento de processos de secagem voltados ao aproveitamento desses resíduos.

Palavras-chave: cinética de secagem; sementes de melão; modelagem matemática; page; Henderson & Pabis.

ABSTRACT

Seed drying is a fundamental step for the preservation, storage, and valorization of agricultural products, as the controlled reduction of moisture content minimizes microbiological and biochemical deterioration processes, thereby contributing to the maintenance of material quality. In this context, seeds from Galia, Cantaloupe, and Piel de Sapo melon varieties exhibit potential for different applications; however, studies addressing their drying kinetics and mathematical modeling remain scarce. Therefore, this study aimed to evaluate and compare mathematical models applied to the drying kinetics of these seeds, identifying the model that best describes moisture removal over time. The seeds were collected, sanitized, placed in previously identified crucibles, and subjected to convective drying in a forced-air oven with air circulation and renewal at temperatures of 50, 60, and 70 °C. Based on the experimental mass data, the moisture ratio was determined, and the Henderson & Pabis and Page models were fitted to the drying curves. Model performance was assessed using the coefficient of determination (R^2), sum of squared errors (SSE), and root mean square error (RMSE). The results revealed a continuous decrease in moisture ratio for all varieties, with higher drying rates observed as temperature increased. The approximate times required to reach hygroscopic equilibrium were 320, 280, and 180–200 min for Cantaloupe seeds; 340, 260, and 220 min for Galia seeds; and 340, 280, and 240 min for Piel de Sapo seeds at 50, 60, and 70 °C, respectively. Cantaloupe seeds exhibited the shortest equilibrium times, indicating a higher drying rate compared with the other varieties. Among the evaluated models, the Page model provided the best statistical fit, with coefficients of determination ranging from 0.9939 to 0.9985 and lower SSE and RMSE values, demonstrating superior ability to describe the nonlinear drying behavior. It can be concluded that the Page model is the most suitable for representing the drying kinetics of the melon seeds investigated, providing valuable information for the optimization and design of drying processes aimed at the valorization of these residues.

Keywords: drying kinetics; melon seeds; mathematical modeling; page; Henderson & Pabis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	22
Figura 2 - Sementes dos melões após lavagem e disposição sobre papel toalha.....	23
Figura 3 - Amostras de sementes distribuídas em cadinhos para o processo de secagem.	24
Figura 4 - Razão de umidade em função do tempo de secagem para as sementes de melão Cantaloupe (a), Gália (b) e Pele de sapo (c), nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.	29
Figura 5 - Ajustes do modelo de Henderson & Pabis aos dados experimentais de secagem do melão Cantaloupe (a), Gália (b) e Pele de sapo (c), nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.	35
Figura 6 - Ajustes do modelo de Page aos dados experimentais de secagem do melão Cantaloupe (a), Gália (b) e Pele de sapo (c), nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modelos matemáticos que representam a cinética de secagem de grãos e sementes.	19
Tabela 2 - Tempos aproximados para atingir o equilíbrio higroscópico nas sementes de melão.	31
Tabela 3 - Estimativa dos Parâmetros do Modelo de Henderson & Pabis para os melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo.	33
Tabela 4 - Estimativa dos Parâmetros do Modelo de Page para os melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Melão (<i>Cucumis Melo</i> L.): produção, importância econômica e valorização das sementes	15
3.2	Fundamentos da secagem de produtos agrícolas	16
3.3	Modelagem matemática na secagem	17
3.4	Modelos matemáticos clássicos aplicados à secagem	18
3.5	Difusividade efetiva e energia de ativação	19
3.6	Efeitos da secagem nas propriedades das sementes	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Local de realização da pesquisa	22
4.2	Obtenção e tratamento da matéria prima	22
4.3	Preparo das amostras	22
4.4	Secagem	23
4.5	Modelagem matemática	25
4.6	Análise de dados	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Estudo da cinética de secagem das sementes de melão sob diferentes temperaturas	29
5.2	Aplicação de modelos empíricos na cinética de secagem das sementes de melão cantaloupe, gália e pele de sapo	32
5.2.1	Modelo de Henderson & Pabis	33
5.2.2	Modelo de Page	35
6	CONCLUSÕES	41
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O melão (*Cucumis melo* L.) é uma cucurbitácea cultivada em várias regiões do mundo e apresenta grande expressão econômica. No Brasil, essa cultura possui destaque no setor frutícola, especialmente na região Nordeste, onde se concentra a maior parte da produção nacional. Segundo dados da Produção Agrícola Municipal, o país produziu 816.939 toneladas de melão em 2024, em uma área colhida de 31.287 hectares. Nesse cenário, o Rio Grande do Norte manteve posição de destaque nacional, com produção de 505.212 toneladas, correspondendo a aproximadamente 61,9% da produção brasileira, além de valor de produção estimado em R\$ 858 milhões (IBGE, 2024).

As sementes de melão, frequentemente tratadas como resíduo industrial, possuem potencial de aproveitamento em diferentes segmentos, como o alimentício, agrícola e farmacêutico, o que justifica a necessidade de estudos voltados à sua conservação e qualidade (Santos *et al.*, 2019).

A secagem de sementes é uma etapa crucial no pós-colheita, pois reduz o teor de umidade a níveis seguros para armazenamento, transporte e futura germinação. A alta umidade acelera a deterioração das sementes, e consequentemente a perda da sua qualidade fisiológica, portanto, o processo de secagem de forma correta é fundamental para manter a viabilidade, o vigor e a longevidade das sementes, prevenindo a sua qualidade a longo tempo. Segundo Corrêa *et al.* (2017), o controle do teor de umidade é um dos principais fatores que determinam a estabilidade do produto durante o armazenamento, influenciando diretamente sua durabilidade, segurança e valor de mercado.

A cinética de secagem de sementes analisa a relação entre a velocidade de remoção da água e o tempo necessário para que o processo ocorra de forma controlada e eficiente. Trata-se de um fenômeno de transferência simultânea de calor e massa entre o ar de secagem e o interior da semente, sendo influenciado principalmente pela temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do fluxo de ar, fatores que determinam diretamente a taxa e a eficiência da secagem (Almeida *et al.*, 2020; Aranha *et al.*, 2023; Nobre, 2013).

A compreensão desse processo é fundamental para ajustar as condições operacionais, evitando danos estruturais às sementes e assegurando a qualidade fisiológica, o vigor e a longevidade durante o armazenamento. Dessa forma, o estudo da

cinética de secagem constitui uma ferramenta essencial para a otimização dos processos de conservação e comercialização de sementes, contribuindo para maior eficiência energética e qualidade do produto final (Madamba, 2003).

A modelagem matemática é amplamente utilizada para simular o processo de secagem de sementes, sendo sua análise inicial fundamentada em estudos de secagem de camadas finas do produto (Reis *et al.*, 2011). Na literatura, podem ser encontrados diversos modelos matemáticos, como o Modelo de Fick, Page, Cavalcanti Mata, e Henderson & Pabis, voltados à previsão da cinética de secagem de sementes, abrangendo tanto modelos teóricos quanto empíricos (Afonso Júnior & Corrêa, 1999). Dessa forma, a aplicação da modelagem matemática permite compreender o comportamento da secagem e otimizar suas condições operacionais, contribuindo para maior eficiência e qualidade do processo.

Na bibliografia estudada foi possível constatar que os dados voltados à pesquisa sobre a secagem da semente de melão (*Cucumis melo L.*) são bastante reduzidos. Mas, foi possível encontrar trabalhos voltados a produtos agrícolas, como secagem de pedaços de melão (Pereira, 2023), Secagem e difusividade de sementes de melão (Silva *et al.*, 2017), Cinética de secagem de sementes de melão descrita por um modelo de difusão (Almeida *et al.*, 2020) Diante disto, podemos observar a importância do desenvolvimento de pesquisas voltadas à semente do melão, que possam proporcionar uma boa secagem, garantindo qualidade, e desenvolvendo uma funcionalidade futura para seu uso.

Este trabalho tem como propósito aplicar modelos matemáticos capazes de representar de forma eficiente as condições de secagem das sementes de melão, utilizando como base dados difusos e empíricos. Buscando, assim, identificar e analisar qual modelo apresenta o melhor desempenho na descrição do processo de secagem das sementes de melão (*Cucumis melo L.*), contribuindo para uma compreensão mais precisa do comportamento do produto durante essa etapa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar modelos matemáticos que representem o processo de secagem das sementes dos melões gália, cantaloupe e pele de sapo, identificando o que melhor descreve o comportamento da remoção de umidade.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar experimentos de secagem das sementes em diferentes temperaturas.
- Determinar as curvas de secagem a partir dos dados experimentais obtidos.
- Ajustar os modelos matemáticos clássicos de Henderson & Pabis e Page aos dados experimentais de secagem.
- Estimar os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados, incluindo a constante de secagem (k), o coeficiente empírico (a) do modelo de Henderson & Pabis e o parâmetro (n) do modelo de Page.
- Comparar o desempenho dos modelos matemáticos por meio dos parâmetros estatísticos R^2 , SSE e RMSE

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Melão (*Cucumis Melo L.*): produção, importância econômica e valorização das sementes

Os melões Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo, que pertencem à espécie *Cucumis melo L.* são frutos produzidos pela planta do meloeiro, que é uma planta herbácea rastejante, da família *Cucurbitaceae* e gênero *cucumis*, da espécie *Cucumis melo L.* Possuem folhas simples lobadas e suas flores são vistosas, e na maioria das vezes unissexuadas (Mccreight *et al.*, 1993; Oliveira *et al.*, 2017).

Entre as variedades de melão, destacam-se os tipos Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo, amplamente comercializados em razão de suas características sensoriais, valor nutricional e aceitação no mercado consumidor. Esses frutos apresentam diferenças quanto ao aspecto externo, aroma, coloração da polpa e conservação pós-colheita, aspectos que justificam sua abordagem no presente estudo. Além do valor comercial da polpa, suas sementes apresentam potencial de aproveitamento, pois têm sido apontadas como fonte de proteínas, lipídios e fibras, reforçando a importância de estudos voltados à sua conservação e valorização (Nunes *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2000; Nascimento, 2001; Malacrida *et al.*, 2007).

Em termos taxonômicos, o melão pertence à espécie *Cucumis melo L.* e faz parte da família *Cucurbitaceae*, grupo amplamente reconhecido pela diversidade de frutos cultivados, onde o melão (*Cucumis melo L.*), por apresentar uma ampla diversidade de sabores, cores e texturas, e também pelo sabor, e possuir grande valor nutricional, ele ganha destaque maior dos outros frutos do mesmo gênero (Maynard, 2000; Petkova, 2015).

Segundo Fao (2016) a área de plantio do melão é de 1,72 milhões de hectares plantados, capaz de gerar um rendimento de 47 milhões de toneladas de melão (*Cucumis melo L.*), onde os maiores produtores são, Irã, Turquia, Egito, Índia, e a China, que é responsável por cerca de 60% da produção, gerando uma renda de US\$ 2,4 bilhões.

No Brasil, o melão é responsável por uma geração de renda anual estimada em R\$ 1,39 bilhões, produzindo cerca de 816,939 mil toneladas, com uma área cultivada de 31,287 mil hectares (IBGE, 2024). Apesar do Brasil produzir melão em quase todo seu território, sua produção está concentrada na região Nordeste, onde é responsável por 90%

do volume produzido no país, tendo o Rio Grande do Norte como o maior produtor (Calixto *et al.*, 2019; Ornellas *et al.*, 2019).

As sementes, na maioria das vezes descartadas, têm um valor considerável de proteínas, que são benéficas a saúde, composta de ácidos graxos, como o ácido oleico (24,8-25,6%) e o ácido linoleico (51,1-58,5%), e também ômega-3 (Maran; Priya, 2015; Ren *et al.*, 2013). Segundo Yanty *et al.* (2008) as sementes de melão possuem baixo teor de umidade (4,5%) e destacam-se pelo seu elevado valor nutricional. Com aproximadamente 25% de proteína bruta, 25% de lipídios, 23,3% de fibras, 2,4% de cinzas e 19,8% de carboidratos, elas representam uma fonte rica e equilibrada de nutrientes essenciais.

A variedade de uso das sementes do melão é muito ampla, desde a seleção de frutos para coletar suas sementes para futura germinação, e comumente no uso doméstico na extração de óleo, diante disto a indústria vem mostrando o potencial das sementes na produção de biodiesel, sabão, detergentes (Jarret *et al.*, 2012; Oluba *et al.*, 2011; Giwa, Abdullah & Adam, 2010; Ogbe & George, 2012; Nyakuma *et al.*, 2018).

No uso medicinal, segundo Maran & Priya (2015) a semente contribui para o aumento da resposta imunológica, ajuda a reduzir a probabilidade de eventos cardiovasculares, e auxilia na redução de gordura no sangue.

3.2 Fundamentos da secagem de produtos agrícolas

A secagem é definida como um processo de transferência simultânea de calor e massa (umidade) entre o produto e o ar de secagem (Silva *et al.*, 1995). Existem vários métodos de conservação de produtos agrícolas e alimentos para armazenamento, dentre esses, a secagem é o mais utilizado quando comparado a outros métodos de conservação, diminuindo processos de degradação enzimática e oxidativa, somada à vantagem de dispensar refrigeração o que contribui para a redução do gasto energético. A secagem inibe a presença de possíveis insetos, e é capaz de diminuir danos físicos e químicos à estrutura da semente (Ullmann *et al.*, 2010; Faria *et al.*, 2014).

A maioria dos métodos para secar sementes, utiliza o ar como seu mecanismo principal para a troca de calor e massa. Nesse processo, a variação de temperatura, e a velocidade do ar influenciam nesse processo, podendo acelerar a remoção de umidade das sementes (Bashir *et al.*, 2016).

O comportamento higroscópico das sementes é alcançado quando as sementes estão em equilíbrio com a umidade do ar, quando atingem a mesma temperatura, portanto apresentando um estado fundamental para um armazenamento seguro (Bordignon, 2009). Esse equilíbrio, também conhecido como umidade higroscópica ou de equilíbrio, se dá pelo fato que o teor de umidade da semente cuja tensão de vapor d'água é igual à do ar ambiente (Bacchi, 1959).

3.3 Modelagem matemática na secagem

A modelagem matemática é uma ferramenta fundamental para lidar com a complexidade da secagem de produtos agrícolas, além de possibilitar a obtenção de condições operacionais adequadas através da otimização do processo (Castro; Mayorga; Moreno, 2018). É possível encontrar vários modelos propostos para poder analisar a secagem de produtos, como a semente do melão (*Cucumis melo L.*), são eles os empíricos, os semiteóricos e os teóricos (Afonso Júnior & Corrêa, 1999).

Ao longo do desenvolvimento da cinética de secagem, os modelos empíricos foram desenvolvidos para propor uma taxa de remoção da umidade dos produtos, entre esses modelos podendo ser destacados a Teoria da Difusão Líquida, a Teoria Capilar, a Teoria de Luikov, a Teoria de Philip e de Vries, a Teoria de Krisher-Berger e Pei e a Teoria da Condensação-Evaporação (Martinazzo *et al.*, 2007).

A cinética de secagem de diversos produtos agrícolas, pode ser representada por vários modelos matemáticos, entre esses utiliza-se os modelos semiteóricos, que se baseiam na Lei de Newton, para descrever o resfriamento do produto, aplicando a sua transferência de massa, diante disto, podemos citar os modelos mais utilizados na cinética de secagem, como o de Henderson e Pabis, o de Page e o de Midilli. (Madamba, 2003; Siqueira *et al.*, 2013).

“A simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água são de fundamental importância para entender e otimizar o processo de secagem” (Berbet *et al.*, 1995). Diante da modelagem proposta, temos os modelos teóricos, onde podemos incluir a equação de que melhor descreve a o fluxo da umidade do produto em consideração a conservação da sua massa, representado pela lei de Fick, este modelo tem sido o mais usado para descrever o processo de secagem de sementes, e outros produtos (Srikiatden & Roberts, 2006; Hassini *et al.*, 2007; Oliveira, 2009; Celma *et al.*, 2009; Puente-Díaz *et al.*, 2013; Araujo, 2000).

As curvas de secagem, adquiridas com os modelos matemáticos variam com a espécie a qual está sendo aplicada, com as condições ambientais, e o preparo do produto no pós-colheita, assim como muitos outros fatores. Diante disso, os modelos matemáticos têm sido ferramentas importantes no estudo de secagem de sementes, e produtos agrícolas (Resende *et al.*, 2008; 2009; 2010).

O processo de secagem é uma etapa muito importante em vários setores de empresas, com um alto consumo de energia, apresentando cerca de 10% a 15% do consumo mundial de energia industrial (Bennamoun, 2011; Elhage *et al.*, 2018). “Em uma indústria intensiva em energia que utiliza aquecimento ou secagem como parte do processo, melhorar a eficiência energética em 1% pode resultar em aumento de 10% no lucro” (Beedie, 1995). Diante disto, vem sendo desenvolvidos diversos trabalhos de pesquisa, voltados à modelagem matemática, para otimizar o desempenho da secagem, a fim de uma boa eficiência energética industrial (Kudra, 2004).

3.4 Modelos matemáticos clássicos aplicados à secagem

A modelagem matemática é uma ferramenta importante para analisar a secagem de sementes de melão (*Cucumis melo L.*), a relação das equações de equilíbrio, a estrutura do material, analisando a variação das propriedades térmicas, e a umidade durante o processo de secagem (Kumar *et al.*, 2012). Segundo Araujo (2017), os modelos matemáticos estão relacionados a fatores externos ao produto, relacionando a transferência de massa com a energia do ambiente. Entre os modelos mais empregados na análise da secagem de grãos e sementes, destacam-se aqueles utilizados para ajustar os dados experimentais e representar a cinética do processo. Neste sentido, diversos modelos matemáticos, Equações 1-8, têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (Resende *et al.*, 2010).

Tabela 1 - Modelos matemáticos que representam a cinética de secagem de grãos e sementes.

Modelo	Equação	Referências
Lewis	$RU = e^{at}$ (1)	(Kaleta; Górnick, 2010)
Page	$RU = e^{-kt^n}$ (2)	(Diamante <i>et al.</i> , 2010)
Henderson & Pabis	$RU = a e^{-Kt}$ (3)	(Diamante <i>et al.</i> , 2010)
Logarithmic	$RU = a e^{-kt} + c$ (4)	(Yaldiz <i>et al.</i> , 2001)
Midili-Kucuk	$RU = a e^{(-k(t^n)+bt)}$ (5)	(Sacilik; Elicin, 2006)
Dois Termos	$RU = a e^{-k_0t} + b e^{-k_1t}$ (6)	(Madamba; Driscoll; Buckle, 1996)
Dois Termos exp.	$RU = a e^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$ (7)	(Ertekin; Yaldiz 2004)
Wang & Sing	$RU = 1 + at + bt^2$ (8)	(Kaleta; Górnick, 2010)

Fonte: Autoria Própria (2026).

As razões de umidade do produto RU, Equação 9, determina o equilíbrio higroscópico da semente, t: tempo (h); as expressões, k, k₀, k₁: são constantes de secagem, s⁻¹, as letras a, b, c, n; são coeficientes dos modelos matemáticos.

$$RU = \frac{U^* - U_e}{U_i - U_e} \quad (9)$$

Em que, U* Umidade no ponto experimental (b.s); U_e: Umidade de equilíbrio (b.s); U_i: Umidade inicial.

3.5 Difusividade efetiva e energia de ativação

Segundo Torgul & Pehlivan (2003), os modelos difusivos baseados na teoria de Fick são amplamente utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, incluindo grãos e sementes. De acordo com Brooker *et al.* (1992), a teoria da difusão líquida considera que a movimentação da água no interior do material ocorre em função do gradiente de concentração, sendo frequentemente representada pela segunda lei de Fick.

É entendido como difusividade líquida, o processo de remoção da umidade de um material, removendo a água que está presente no produto. Ela pode variar de acordo com as condições que é submetida no processo, como temperatura, e a velocidade que o ar

circula, deste modo, podendo ser denominada de difusividade efetiva da água (Oliveira *et al.*, 2006).

A equação do tipo Arrhenius, tem sido bastante usada para descrever a temperatura, e sua importância na parte líquida presentes nos alimentos, que possuem teor de açúcar mais elevado, e também em suas sementes (Khalil *et al.*, 1989). A equação de Arrhenius, relaciona a velocidade e sua variação, com a temperatura absoluta do produto, desta forma, tendo influência do parâmetro energético, que é a energia de ativação (Leiva; Crnkovic; Santos, 2006).

$$\ln(k) = \ln(k_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (10)$$

Em que k corresponde ao parâmetro cinético avaliado; k_0 é o fator pré-exponencial; E_a é a energia de ativação; R é a constante universal dos gases; e T é a temperatura absoluta, expressa em Kelvin.

A relevância da caracterização da cinética de secagem de sementes, é baseada nos dados experimentais coletados em várias etapas do processo, permitindo demonstrar a variação da massa úmida, em relação ao tempo de processo, que analisa o transporte da umidade da semente (Santana, 2011). Segundo Madamba, (2003) esses parâmetros que são observados, permitem entender a cinética de secagem, possibilitando comparar uma variedade de materiais, para que o processo ocorra em boas condições de operação, auxiliando na gestão eficiente do pós-colheita, desta forma assegurando a conservação da qualidade das sementes.

3.6 Efeitos da secagem nas propriedades das sementes

A secagem de sementes pode ocasionar alterações físico-químicas importantes em razão da remoção da umidade presente tanto na superfície quanto no interior do material, podendo provocar danos físicos à estrutura celular, como fissuras externas e internas, além de causar danos irreversíveis e aumentar a suscetibilidade à contaminação por microrganismos (Embrapa, 2020).

Neste sentido Villela (1991) destaca que o processo de secagem não aumenta o percentual de sementes quebradas, mas pode provocar fissuras internas ou superficiais, tornando as sementes mais suscetíveis à quebra durante o beneficiamento.

Do ponto de vista da qualidade fisiológica e da germinação, Moraes (2000) ressalta que, o tempo que leva para as sementes perderem sua qualidade, após o seu ponto máximo

de maturação fisiológica tem influência direta na qualidade, tendo a secagem como beneficiamento no cultivo, garantindo boas condições no campo, que favorecem o armazenamento, garantindo a qualidade, e o seu potencial germinativo.

Diante disto, os efeitos de secagem têm um papel fundamental para garantir a qualidade das sementes. Reduzir o teor de umidade é essencial para garantir o armazenamento seguro, preservando as sementes de alterações físicas e químicas, que resultam na qualidade da semente, garantindo a colheita próximo a sua maturidade fisiológica, mantendo suas características originais e assegurando sua longevidade durante o armazenamento (Baudet *et al.* 1999).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de realização da pesquisa

A pesquisa foi realizada nos laboratórios de Química Geral e Química Aplicada, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), *Campus* Pau dos Ferros – RN. A Figura 1 apresenta o fluxograma da parte experimental.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Adaptado de ChatGPT pelo autor (OpenAI, 2026).

4.2 Obtenção e tratamento da matéria prima

As sementes analisadas neste estudo foram obtidas a partir de melões das variedades Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo (*Cucumis melo* L.), adquiridos junto a produtores locais e comerciantes do município de Pau dos Ferros-RN. Durante a aquisição, observou-se a procedência e o estado geral dos frutos, priorizando aqueles em boas condições aparentes de conservação e qualidade. Após a seleção, os melões foram encaminhados para a etapa de preparo das amostras.

4.3 Preparo das amostras

No processo de preparação das amostras, os melões (*Cucumis melo* L.) foram submetidos à limpeza superficial em água corrente, com o objetivo de remover sujidades presentes na casca. Em seguida, os frutos foram cortados manualmente em porções menores, permitindo a retirada das sementes aderidas à polpa.

As sementes de cada variedade foram separadas em recipientes distintos, identificados como Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo, a fim de evitar mistura entre as amostras e possibilitar a comparação entre os tratamentos. Posteriormente, as sementes foram lavadas em água corrente e mantidas em repouso para o escoamento do excesso de água superficial, antes de serem submetidas ao processo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

4.4 Secagem

A secagem das sementes dos melões Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo foi realizada por processo convectivo, utilizando estufa com circulação e renovação de ar (SOLAB, Modelo SL – 102). Após a etapa de lavagem e higienização, as sementes foram dispostas sobre papel absorvente, com o objetivo de reduzir o excesso de água superficial antes da pesagem e do acondicionamento nos cadinhos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Sementes dos melões após lavagem e disposição sobre papel toalha.



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Antes da realização dos ensaios de secagem, foi determinada a umidade inicial das sementes. Para isso, os cadinhos secos foram inicialmente pesados em balança analítica (Marte modelo AUW – 220), registrando a massa individual de cada recipiente.

Em seguida, as sementes foram adicionadas aos respectivos cadinhos e realizou uma nova pesagem, obtendo a massa do conjunto cadinho mais amostra úmida. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C, permanecendo por 24 horas, com o objetivo de remover a umidade presente no material. Após esse período, os cadinhos foram retirados da estufa, resfriados e novamente pesados novamente, permitindo a obtenção da massa seca das sementes e, conseqüentemente, o cálculo do teor de umidade inicial das amostras.

$$U_i = \frac{M_u + M_s}{M_s} * 100 \quad (11)$$

Em que U_i corresponde ao teor de umidade inicial em base seca, M_u representa a massa da amostra úmida e M_s corresponde à massa seca da amostra após secagem em estufa.

Em seguida, as amostras foram distribuídas em cadinhos previamente identificados, considerando três repetições para cada tipo de semente de melão. Essa identificação permite o controle individual das amostras ao longo do processo experimental, evitando troca de materiais e possibilitando a comparação posterior entre as variedades analisadas. Antes da inserção na estufa, foi realizada a pesagem dos cadinhos vazios e, posteriormente, do conjunto formado pelo cadinho e pelas sementes, utilizando balança analítica de precisão. A Figura 3 apresentam a etapa de organização e identificação das amostras nos cadinhos.

Figura 3 - Amostras de sementes distribuídas em cadinhos para o processo de secagem.



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O processo de secagem foi realizado em três níveis de temperatura: 50 °C, 60 °C e 70 °C. A adoção dessas temperaturas permite avaliar a influência do aumento térmico sobre a taxa de remoção de umidade das sementes, possibilitando a construção das curvas de secagem e a posterior aplicação dos modelos matemáticos. Inicialmente, as amostras foram submetidas à temperatura de 50 °C, sendo posteriormente repetido o mesmo procedimento experimental para as temperaturas de 60 °C e 70 °C, mantendo o padrão de pesagem, identificação e acompanhamento das massas.

Após a pesagem inicial, os cadinhos contendo as sementes foram posicionados na estufa de circulação de ar. Durante a secagem, as amostras foram retiradas em intervalos de tempo previamente definidos para nova pesagem e, em seguida, recolocadas no equipamento para continuidade do processo. Nos primeiros momentos da secagem, foram adotados intervalos menores, 10 minutos, devido à maior perda de umidade inicial. À medida que a variação de massa se tornou menos intensa, os intervalos foram ampliados para 30 minutos, permitindo o acompanhamento da redução de massa sem comprometer o controle experimental. O procedimento de retirada, pesagem e retorno das amostras foi repetido até que as sementes atingissem massa constante, condição utilizada como indicativo de estabilização da perda de umidade no processo.

Dessa forma, os dados de massa obtidos ao longo do tempo foram utilizados para determinar a variação do teor de umidade das sementes e, calcular a razão de umidade, parâmetro necessário para a construção das curvas de cinética de secagem e para o ajuste dos modelos matemáticos aplicados ao processo.

4.5 Modelagem matemática

A Tabela 1 apresenta modelos matemáticos frequentemente utilizados na literatura para representar a cinética de secagem de grãos e sementes. Entretanto, neste trabalho, a modelagem matemática dos dados experimentais foi realizada especificamente por meio dos modelos de Henderson & Pabis e Page. Esses modelos foram aplicados aos dados obtidos durante a secagem das sementes dos melões Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, com o objetivo de representar o comportamento da razão de umidade em função do tempo de secagem. Esses modelos foram adotados por permitirem a descrição da cinética de secagem por meio de parâmetros ajustados aos dados experimentais, possibilitando a comparação entre as variedades analisadas e as condições térmicas aplicadas (Resende *et al.*, 2010).

A razão de umidade foi utilizada como variável dependente da modelagem matemática, sendo calculada a partir da relação entre a umidade do produto em determinado instante, a umidade de equilíbrio e a umidade inicial, conforme a Equação (12). Esse parâmetro adimensional permite representar a redução da umidade ao longo do tempo e comparar o comportamento da secagem entre diferentes temperaturas e variedades de melão.

$$RU = \frac{U^* - U_e}{U_i - U_e} \quad (12)$$

Em que RU representa a razão de umidade, adimensional; U^* corresponde à umidade do produto em determinado ponto experimental, em base seca; U_e representa a umidade de equilíbrio, em base seca; e U_i corresponde à umidade inicial, em base seca.

O modelo de Henderson & Pabis considera a presença de um coeficiente empírico associado à amplitude da curva e de uma constante relacionada à velocidade de secagem, sendo representado conforme a formulação indicada na tabela 1 e Equação (13) de modelos matemáticos.

$$RU = a * e^{-kt} \quad (13)$$

Onde RU representa a razão de umidade, adimensional; a corresponde ao coeficiente empírico do modelo; k representa a constante de secagem; e t corresponde ao tempo de secagem.

O modelo de Page também foi aplicado ao ajuste dos dados experimentais, sendo caracterizado por uma modificação do comportamento exponencial simples. Nesse modelo, conforme mostra a Equação (14), a constante k está associada à taxa de secagem, enquanto o parâmetro n contribui para o ajuste da curvatura da curva de secagem, permitindo melhor representação dos dados quando a perda de umidade não ocorre de forma puramente exponencial. Por essa razão, o modelo de Page é frequentemente empregado na modelagem de materiais biológicos e produtos agrícolas (Corrêa *et al.*, 2010; Madamba, 1996).

$$RU = e^{-kt^n} \quad (14)$$

Onde RU representa a razão de umidade, adimensional; k corresponde à constante de secagem; t representa o tempo de secagem, em minutos; e n corresponde ao parâmetro empírico de ajuste do modelo.

A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio da análise conjunta de três indicadores principais, o coeficiente de determinação R^2 , a soma dos erros quadráticos SSE e a raiz quadrada do erro médio RMSE, conforme as Equações (15), (16) e (17), respectivamente.

A importância do R^2 está relacionada à verificação da proximidade entre os valores experimentais e os valores estimados pelos modelos matemáticos, quanto mais próximo de 1 for o valor desse coeficiente, maior será a capacidade do modelo em representar adequadamente os dados obtidos no processo de secagem. Já os parâmetros SSE e RMSE foram considerados para avaliar a magnitude dos desvios entre os valores observados e os valores preditos, de modo que menores valores indicam melhor desempenho do modelo matemático (Silva *et al.* 2018).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (15)$$

Onde R^2 representa o coeficiente de determinação; Y_i representa o valor experimental observado; $\hat{Y}_i$ corresponde ao valor estimado pelo modelo; $\bar{Y}$ representa a média dos valores experimentais; e n corresponde ao número total de observações.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (16)$$

Onde SSE representa a soma dos quadrados dos erros; Y_i corresponde ao valor experimental observado; e $\hat{Y}_i$ representa o valor estimado pelo modelo matemático.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (17)$$

Em que RMSE representa a raiz do erro quadrático médio; n corresponde ao número total de observações; Y_i representa o valor experimental observado; e $\hat{Y}_i$ corresponde ao valor predito pelo modelo.

4.6 Análise de dados

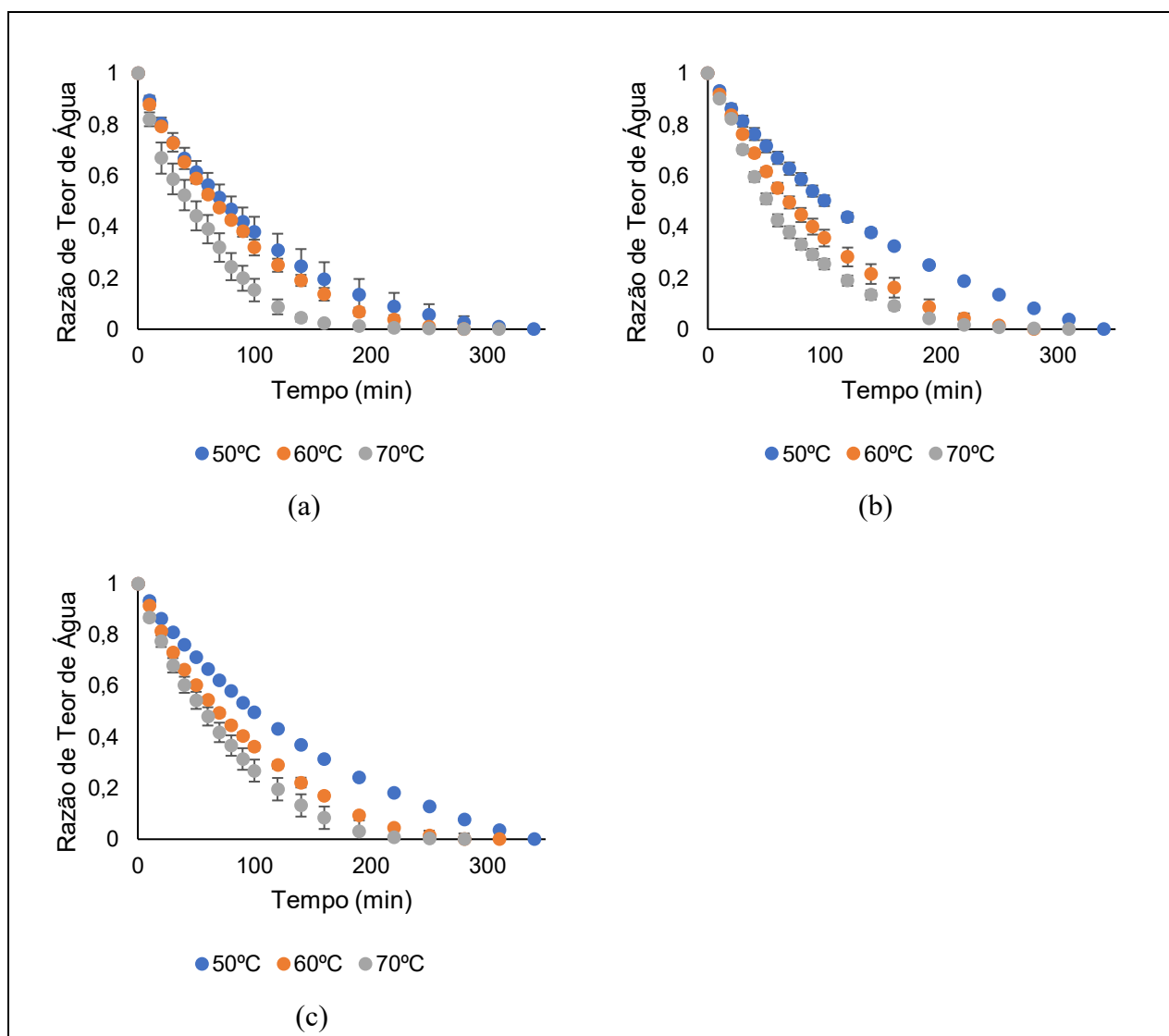
Os resultados obtidos foram organizados em planilha eletrônica, e processados em no Microsoft Office Excel e Statistica 7.0, possibilitando o cálculo da razão de umidade e a construção das curvas de cinética de secagem para as sementes dos melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo. Posteriormente, foram ajustados os modelos de Henderson & Pabis e Page para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, sendo a qualidade dos ajustes avaliada pelos parâmetros R^2 , SSE e RMSE.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estudo da cinética de secagem das sementes de melão sob diferentes temperaturas

Inicialmente, são apresentados os gráficos da razão de umidade em função do tempo de secagem para as sementes dos melões dos tipos Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo. A razão de umidade expressa a quantidade de água presente no produto em relação à umidade inicial e à umidade de equilíbrio, possibilitando comparar diferentes condições de secagem, como temperatura e o tempo de processo.

Figura 4 - Razão de umidade em função do tempo de secagem para as sementes de melão Cantaloupe (a), Gália (b) e Pele de sapo (c), nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A utilização da razão de umidade facilita a interpretação do processo de secagem, uma vez que representa de forma clara a remoção progressiva de água ao longo do tempo. Segundo Farias *et al.* (2018), o uso de variáveis adimensionais, como a razão de umidade (RU), possibilita a aplicação de modelos matemáticos empíricos com maior precisão estatística, permitindo identificar quais equações melhor representam a resistência interna ao fluxo de massa em diferentes materiais biológicos, como as sementes dos melões Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo.

Observando as Figuras 4a, 4b e 4c, verifica-se que, para todas as variedades de melão, a razão de umidade diminui continuamente ao longo do tempo, caracterizando o comportamento típico de processos de secagem em camada fina. Esse resultado está em concordância com Celestino (2010), que descreve a cinética de secagem de produtos biológicos como uma função exponencial decrescente, na qual ocorre uma redução mais acentuada do teor de umidade nos estágios iniciais, seguida de uma aproximação gradual ao equilíbrio higroscópico. De forma semelhante, Almeida *et al.* (2020) destacam que, para sementes de melão, esse comportamento está associado à evaporação inicial da água livre presente na superfície do material.

Nesse contexto, observa-se que a redução da razão de umidade é mais acentuada no início do processo, indicando maior velocidade de remoção de água nessa etapa. Isso ocorre porque a água superficial, por apresentar menor ligação com a estrutura do material, é removida com maior facilidade (Santos, 2018). À medida que o tempo de secagem avança, a redução da razão de umidade torna-se mais lenta, sugerindo diminuição da velocidade de secagem e predominância da difusão interna como mecanismo de transferência de massa. Desta forma, o processo passa a ser controlado pela difusão interna da umidade, na qual a água presente no interior das sementes deve migrar até a superfície antes de ser evaporada (Celestino, 2010; Almeida *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2018). Segundo Barros (2023), essa etapa é caracterizada por maior resistência ao fluxo de massa, o que justifica a desaceleração observada nas curvas de secagem.

Observa-se que as Figuras 4a, 4b e 4c apresentam comportamento semelhante de secagem, caracterizado pela redução contínua da razão de umidade ao longo do tempo para todas as temperaturas avaliadas (50, 60 e 70 °C). Em geral, observa-se que o aumento da temperatura promove maior taxa de remoção de água das sementes, reduzindo o tempo necessário para atingir o equilíbrio. Esse comportamento é esperado, uma vez que

temperaturas mais elevadas aumentam o gradiente térmico e favorecem a difusão da umidade do interior do material para a superfície.

Na Figura 4a, referente às sementes de melão Cantaloupe, verifica-se redução progressiva da razão de umidade em todas as temperaturas, sendo a secagem a 70 °C a mais rápida. As curvas de 60 e 70 °C apresentaram comportamento relativamente próximo, enquanto a 50 °C o processo ocorreu de forma mais lenta, exigindo maior tempo para atingir baixos valores de umidade.

Para as sementes de melão Gália Figura 4b, observou-se comportamento semelhante, porém com maior tempo de secagem em comparação ao Cantaloupe, principalmente na temperatura de 50 °C. As curvas mostraram maior espaçamento entre as temperaturas, indicando maior influência térmica sobre a cinética de secagem desse material. A secagem a 70 °C novamente apresentou maior eficiência na remoção de água.

No caso das sementes de melão Pele de Sapo, Figura 1c, verificou-se o processo de secagem mais lento entre os três materiais analisados, especialmente a 50 °C, onde a razão de umidade permaneceu elevada por um período mais prolongado. Isso sugere maior resistência interna à difusão da água ou diferenças estruturais da matriz da semente. Entretanto, com o aumento da temperatura para 60 e 70 °C, houve aceleração significativa da secagem, reduzindo consideravelmente o tempo do processo.

De maneira comparativa, observou-se que o tempo necessário para atingir o equilíbrio higroscópico variou entre as variedades de melão e as temperaturas avaliadas, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempos aproximados para atingir o equilíbrio higroscópico nas sementes de melão

Variedade de melão	50 °C	60 °C	70 °C
Cantaloupe	320 min	280 min	180–200 min
Gália	340 min	260 min	220 min
Pele de Sapo	340 min	280 min	240 min

Fonte: Autoria Própria (2026).

A partir dos dados apresentados, verifica-se que o aumento da temperatura reduziu o tempo de secagem para todas as variedades avaliadas. As sementes de melão Cantaloupe apresentaram secagem mais rápida, especialmente a 70 °C, enquanto as sementes de Gália e Pele de Sapo demandaram maior tempo para atingir o equilíbrio higroscópico. Essas diferenças podem estar relacionadas às características próprias de

cada variedade, como composição química, estrutura física, espessura do tegumento e distribuição da água na matriz da semente. Como esses fatores não foram avaliados isoladamente neste estudo, essa interpretação deve ser compreendida como uma possível explicação para as variações observadas no tempo de secagem, uma vez que tais características podem influenciar os mecanismos de transferência de massa e a difusão da umidade durante a secagem (Almeida *et al.*, 2020).

Segundo Silva *et al.* (2021), o tamanho e a forma, como comprimento, largura e espessura das sementes, são propriedades definidas geneticamente que alteram a relação área superficial e volume, impactando diretamente a velocidade de evaporação. Celestino (2010) fala que, a variação da composição química entre os melões, principalmente no que diz respeito ao teor de lipídios e fibras, exerce influência direta na relação higroscópica das sementes, explicando por que linhagens como o Gália podem apresentar maior dificuldade na remoção de umidade em comparação a outras variedades de melão.

Dessa forma, a influência das características estruturais do material está diretamente relacionada aos mecanismos de transferência de massa. Assim, conforme destacado por Pereira (2023), a cinética de secagem de produtos derivados do melão é predominantemente controlada por processos difusivos internos, especialmente nas etapas finais do processo. Esse comportamento evidencia que a variedade do melão exerce influência significativa na cinética de secagem, reforçando a importância da caracterização física e estrutural do material tanto na modelagem do processo quanto no dimensionamento de sistemas de secagem.

5.2 Aplicação de modelos empíricos na cinética de secagem das sementes de melão cantaloupe, gália e pele de sapo

Para descrever matematicamente o comportamento experimental das curvas de secagem, foram ajustados aos dados os modelos empíricos de Henderson & Pabis e Page, são amplamente utilizados na modelagem da cinética de secagem de produtos agrícolas. Esses modelos permitem estabelecer uma relação funcional entre a razão de umidade e o tempo de secagem, possibilitando a análise do processo por meio de parâmetros ajustados a partir de dados experimentais.

Na análise dos parâmetros estimados para o modelo de Henderson & Pabis, destaca-se a relevância da constante k , que está ligada à taxa de secagem do material. Esse parâmetro é utilizado para descrever a velocidade de remoção de umidade ao longo

do tempo, de modo que valores mais elevados de k indicam maior rapidez no processo de secagem, refletindo menor resistência à transferência de massa no interior do material (Celestino, 2010).

5.2.1 Modelo de Henderson & Pabis

O modelo de Henderson & Pabis consiste em uma equação exponencial simples, sendo amplamente empregado devido à sua facilidade de aplicação e à boa capacidade de ajuste em processos de secagem em camada fina (Celestino, 2010).

A Tabela 3 apresenta os parâmetros ajustados do modelo de Henderson & Pabis para as sementes dos melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. De maneira geral, o modelo apresentou excelente ajuste aos dados experimentais para todas as amostras e condições avaliadas, evidenciado pelos elevados coeficientes de determinação (R^2 superiores a 0,99) e pelos baixos valores de SSE e RMSE.

Tabela 3 - Estimativa dos Parâmetros do Modelo de Henderson & Pabis para os melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo.

	T(°C)	k	a	R²	SSE	RMSE
Cantaloupe	50	0,010072	1,001857	0,9965	0,006497	0,000361
	60	0,011580	1,015328	0,9927	0,012178	0,000761
	70	0,017573	0,997167	0,9934	0,011322	0,000666
	T(°C)	k	a	R²	SSE	RMSE
Gália	50	0,007478	1,023363	0,9904	0,017426	0,000968
	60	0,011039	1,039092	0,9923	0,013260	0,000829
	70	0,014330	1,041611	0,9962	0,007007	0,000412
	T(°C)	k	a	R²	SSE	RMSE
Pele de Sapo	50	0,007627	1,024390	0,9910	0,016470	0,000915
	60	0,010946	1,022588	0,9932	0,012383	0,000728
	70	0,013435	1,015112	0,9938	0,010484	0,000655

Fonte: Autoria Própria (2026).

O parâmetro k , associado à constante de secagem e diretamente relacionado à velocidade de remoção de água, aumentou com a elevação da temperatura para os três tipos de melão, indicando maior taxa de secagem em temperaturas mais elevadas. Para o melão Cantaloupe, os valores de k variaram de 0,010072 a 0,017573 min^{-1} , sendo os maiores entre os materiais analisados, principalmente a 70 °C, demonstrando comportamento de secagem mais acelerado. O melão Gália apresentou valores entre

0,007478 e 0,014330 min^{-1} , enquanto o Pele de Sapo variou de 0,007627 a 0,013435 min^{-1} , indicando processo de secagem relativamente mais lento quando comparado ao Cantaloupe.

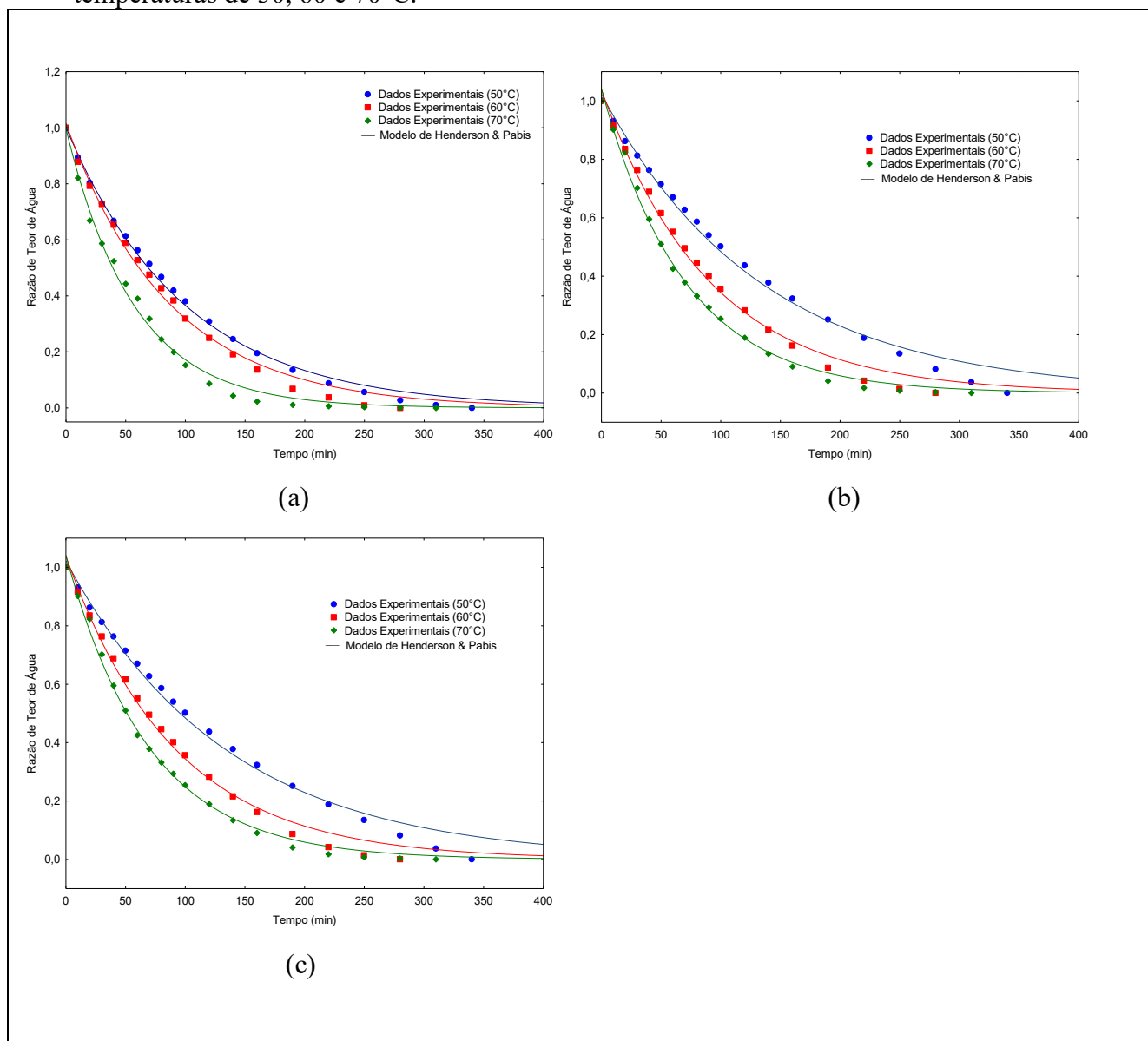
Em relação ao parâmetro a , os valores permaneceram próximos da unidade em todas as condições experimentais, variando entre 0,997167 e 1,041611. Segundo Pereira (2023), esse parâmetro funciona como um coeficiente de ajuste que, aliado à constante de secagem, garante que a representação teórica minimize os desvios em relação aos dados observados em laboratório. Esse comportamento demonstra boa representatividade do modelo para descrever a fase de decaimento da razão de umidade das sementes. O melão Gália apresentou os maiores valores de a , especialmente a 70 °C (1,041611), sugerindo leve diferença estrutural no comportamento de secagem em relação às demais variedades.

Os coeficientes de determinação (R^2) apresentaram valores elevados para todos os tratamentos, variando de 0,9904 a 0,9965, confirmando elevada correlação entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo de Henderson & Pabis. O melhor ajuste foi observado para o melão Cantaloupe a 50 °C ($R^2 = 0,9965$), enquanto o menor valor foi verificado para o melão Gália a 50 °C ($R^2 = 0,9904$), embora ainda considerado altamente satisfatório.

Os parâmetros estatísticos de erro, SSE e RMSE, apresentaram baixos valores em todas as condições avaliadas, ficando próximos de zero, o que indica pequena diferença entre os dados experimentais e os valores preditos pelo modelo. Esse comportamento reforça a boa qualidade do ajuste obtido pelo modelo de Henderson & Pabis. Entre as condições analisadas, o melão Cantaloupe apresentou os menores erros médios, principalmente a 50 °C, com SSE de 0,006497 e RMSE de 0,000361, evidenciando melhor desempenho do modelo para essa variedade. Por outro lado, os maiores valores de SSE e RMSE foram observados para o melão Gália a 50 °C, sugerindo ligeiramente maior variabilidade experimental nessa condição.

De forma comparativa, os resultados indicam que as sementes de melão Cantaloupe apresentaram maior taxa de secagem e melhor ajuste estatístico do modelo de Henderson & Pabis, enquanto os melões Gália e Pele de Sapo apresentaram comportamento cinético semelhante, porém com menores constantes de secagem. Além disso, o aumento da temperatura influenciou positivamente a cinética de secagem para todas as variedades, confirmando a forte dependência térmica do processo. As Figuras 5a, 5b e 5c apresentam os ajustes do modelo de Henderson & Pabis aos dados experimentais de secagem dos melões cantaloupe (a), gália (b) e pele de sapo (c).

Figura 5 - Ajustes do modelo de Henderson & Pabis aos dados experimentais de secagem das sementes do melão Cantaloupe (a), Gália (b) e Pele de sapo (c), nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.2.2 Modelo de Page

O modelo de Page consiste em uma modificação empírica do modelo exponencial, oferecendo maior flexibilidade para representar a cinética de secagem para materiais biológicos devido à inclusão do parâmetro n em sua formulação matemática (Corrêa *et al.*, 2010). Neste modelo, a constante k atua como o coeficiente de secagem, estando intrinsecamente relacionada à taxa de remoção de água e à rapidez com que o material

atinge o equilíbrio higroscópico sob condições térmicas constantes (Madamba, 1996). Já o parâmetro n reflete o comportamento difusivo do processo, sendo responsável pela melhor adaptação do modelo às fases finais da secagem, etapa em que a umidade remanescente se encontra fortemente ligada a matriz biológica. Valores de n diferentes da unidade ($n \neq 1$) indicam que o processo não apresenta comportamento exponencial puro, característica comum na secagem de materiais biológicos.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros ajustados do modelo de Page, o modelo apresentou desempenho superior ao de Henderson & Pabis para as sementes dos melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo em todas as temperaturas avaliadas (50, 60 e 70 °C). Essa eficácia é comprovada pelos elevados coeficientes de determinação (R^2 superiores a 0,99) e pelos valores mínimos de SSE e RMSE, consolidando a equação de Page como a mais adequada para a predição da cinética de secagem e dimensionamento dos processos.

Tabela 4 - Estimativa dos Parâmetros do Modelo de Page para os melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo.

	T(°C)	k	N	R ²	SSE	RMSE
Cantaloupe	50	0,008067	1,047954	0,9972	0,005254	0,000292
	60	0,006845	1,113525	0,9958	0,007023	0,000439
	70	0,014460	1,047533	0,9939	0,010465	0,000616
	T(°C)	k	N	R ²	SSE	RMSE
Gália	50	0,003869	1,130150	0,9946	0,009834	0,000546
	60	0,004816	1,173512	0,9977	0,003967	0,000248
	70	0,007532	1,138508	0,9985	0,002877	0,000169
	T(°C)	k	N	R ²	SSE	RMSE
Pele de Sapo	50	0,003933	1,130973	0,9951	0,008915	0,000495
	60	0,006370	1,113559	0,9960	0,007384	0,000434
	70	0,008325	1,105720	0,9963	0,006256	0,000391

Fonte: Autoria Própria (2026).

Assim como observado no modelo de Henderson & Pabis, os valores de k para o modelo de Page sofreram influência direta do aporte térmico, indicando que a taxa de remoção hídrica é potencializada em temperaturas mais elevadas.

Conforme detalhado na Tabela 4, a variedade Cantaloupe apresentou maior agilidade cinética, com $k = 0,014460 \text{ min}^{-1}$ a 70 °C, enquanto o Pele de Sapo $0,008325 \text{ min}^{-1}$ e Gália $0,007532 \text{ min}^{-1}$, demonstrando processos relativamente mais lentos sob a mesma condição térmica. De acordo com Silva *et al.* (2018), esse aumento da constante de secagem com a temperatura é uma característica comum em sementes de melão, refletindo a redução da resistência ao fluxo de massa.

De acordo com os dados da Tabela 3, os valores de n situaram-se acima da unidade para as variedades Gália 1,138508 e Pele de Sapo 1,105720 a 70 °C, justificando a superioridade estatística deste modelo para representar a estabilização hídrica final característica de produtos agrícolas.

No modelo de Page, os coeficientes de determinação (R^2) apresentaram valores elevados em todos os tratamentos, variando de 0,9939 a 0,9985, indicando excelente ajuste aos dados experimentais (Tabela 4). O melhor ajuste foi observado para o melão Gália a 70 °C ($R^2 = 0,9985$), enquanto o menor valor ocorreu para o melão Cantaloupe a 70 °C ($R^2 = 0,9939$), ainda superior ao modelo de Henderson & Pabis.

Os parâmetros estatísticos de erro, SSE e RMSE, apresentaram magnitudes reduzidas sob todas as condições avaliadas, indicando uma dispersão mínima entre os valores observados e as curvas simuladas.

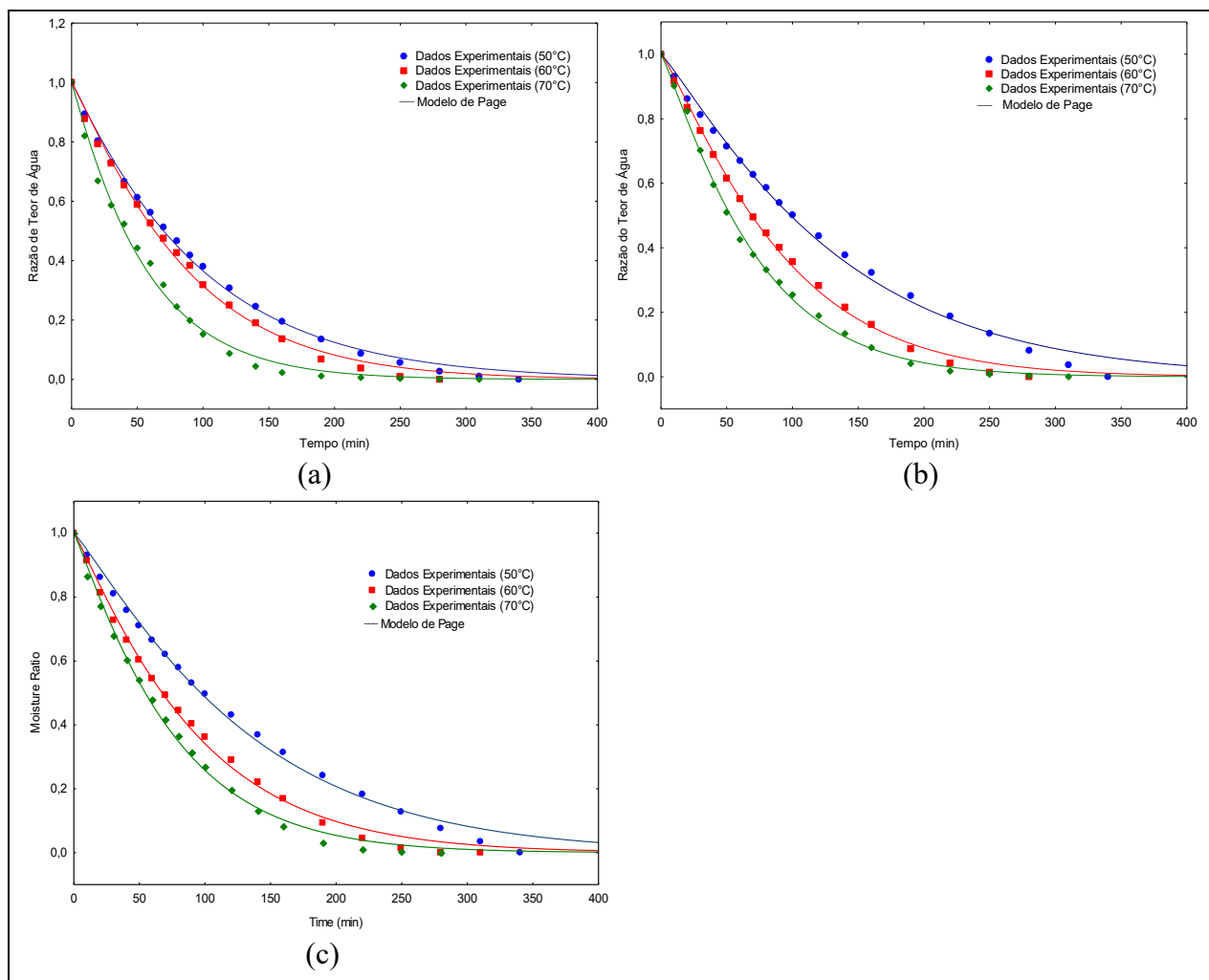
O tipo Gália registrou os menores erros médios do estudo, especialmente sob a temperatura de 70 °C, com SSE de 0,002877 e RMSE de 0,000169, consolidando a alta capacidade preditiva do modelo de Page para esta variedade. Já os maiores valores de SSE e RMSE foram observados para o melão Cantaloupe a 70 °C, sugerindo ligeiramente maior variabilidade experimental.

Comparando os resultados, foi possível observar que as sementes de melão Cantaloupe apresentaram maior taxa de secagem k sob o modelo de Page, evidenciando uma remoção hídrica inicial mais acelerada em relação aos demais tipos de melão.

Os melões Gália e Pele de Sapo apresentaram comportamento cinético semelhante entre si, com constantes de secagem numericamente inferiores às do Cantaloupe, porém com uma maior influência do parâmetro n para descrever a curvatura difusiva nas fases finais do processo. Desta forma, o modelo de Page demonstrou superioridade estatística em comparação ao de Henderson & Pabis para todas as variedades analisadas.

A Figura 6 apresenta os ajustes do modelo de Page aos dados experimentais de secagem das sementes dos melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Figura 6 - Ajustes do modelo de Page aos dados experimentais de secagem das sementes do melão Cantaloupe (a), Gália (b) e Pele de sapo (c), nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Entre os modelos avaliados, o modelo de Page apresentou curvas ajustadas mais próximas dos pontos experimentais, especialmente nas fases finais da secagem, corroborando os menores valores de SSE e RMSE obtidos na análise estatística. Segundo Farias *et al.* (2018), a magnitude reduzida desses erros não compromete a capacidade preditiva dos modelos, sendo o modelo de Page aquele que apresenta melhor concordância visual e estatística na representação da tendência ao equilíbrio higroscópico.

A integração entre os gráficos experimentais e os modelos matemáticos reforça a confiabilidade dos ajustes obtidos, uma vez que a proximidade entre as curvas simuladas e os dados observados em laboratório resultou em valores reduzidos de SSE e RMSE, especialmente para a variedade Gália na temperatura de 70 °C. Segundo Silva *et. al.*, (2018), a concordância entre os dados experimentais e os modelos matemáticos constitui um importante critério de validação das equações utilizadas, assegurando maior

confiabilidade na aplicação dos modelos ao dimensionamento de sistemas de secagem e à otimização do processo. Esse resultado evidencia maior capacidade preditiva do modelo e melhor representação da cinética real de secagem das sementes dos melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo.

A secagem das sementes dos melões Cantaloupe, Gália e Pele de Sapo ocorreu predominantemente em regime de taxa decrescente, comportamento característico de materiais biológicos submetidos à secagem em camada fina. Observou-se que a redução da razão de umidade foi influenciada tanto pela temperatura de secagem quanto pelas características estruturais específicas de cada variedade de melão, fatores que interferem diretamente na transferência interna de massa e na velocidade de remoção de umidade.

Esse padrão cinético é validado por pesquisas recentes, como o estudo de Barros (2023) com sementes de abóbora Cabotiá, no qual se observou que a perda de água ocorre sem períodos de taxa constante, com o equilíbrio sendo atingido mais rapidamente sob temperaturas elevadas entre 100 e 300 minutos. Ao analisar sementes de crambe, Costa et. al., (2011) reforçam que a cinética de secagem é altamente dependente da espécie e da variedade, ressaltando que as curvas de perda de umidade variam conforme as condições ambientais e os métodos de preparo pós-colheita.

Dessa forma, entre os modelos matemáticos avaliados, o modelo de Page apresentou melhor desempenho estatístico na descrição da cinética de secagem, exibindo menores valores de RMSE e SSE em todas as condições térmicas analisadas. Esse desempenho está associado à presença do parâmetro n , que confere maior flexibilidade matemática ao modelo e permite representar com maior precisão as variações da razão de umidade ao longo do tempo, principalmente nas etapas finais do processo. Além da superioridade estatística, esse resultado permite inferir aspectos físico-químicos relevantes sobre o mecanismo de transferência de umidade nas sementes de melão, indicando que a remoção de água não ocorreu de forma puramente superficial ou exponencial simples, mas foi governada predominantemente por mecanismos internos de difusão (Yang *et al.*, 2013).

Nas fases finais da secagem, a água remanescente tende a se encontrar mais fortemente associada à matriz biológica da semente, o que aumenta a resistência à sua migração até a superfície. Esse comportamento reduz progressivamente a taxa de remoção de umidade e é compatível com o regime de taxa decrescente observado em materiais biológicos. Assim, a melhor representatividade do modelo de Page em relação ao modelo de Henderson & Pabis indica que a transferência de massa foi influenciada

pela temperatura do ar de secagem, pela estrutura física das sementes, pela ligação da água à matriz sólida e pelo gradiente de umidade formado entre o interior e a superfície do material (Park *et al.*, 2007; Farias, 2018).

Diante disto, a superioridade do modelo de Page sugere que a remoção de umidade das sementes foi governada principalmente por mecanismos internos de difusão, e não apenas pela evaporação da água superficial. Esse comportamento é compatível com o regime de taxa decrescente, no qual a água remanescente passa a estar mais retida na matriz da semente, aumentando a resistência à transferência de massa. Portanto, o melhor ajuste do modelo de Page evidencia que a secagem das sementes de melão apresentou comportamento não linear, dependente da temperatura, da estrutura do material e da disponibilidade de água no interior das sementes (Alves, 2018).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar modelos matemáticos capazes de representar o processo de secagem das sementes dos melões Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo, identificando aquele com melhor desempenho na descrição da remoção de umidade. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o objetivo geral foi alcançado, uma vez que os dados experimentais permitiram construir as curvas de cinética de secagem, ajustar os modelos de Henderson & Pabis e Page e comparar o desempenho estatístico de cada modelo nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

A caracterização experimental da secagem demonstrou que a razão de umidade reduziu progressivamente ao longo do tempo para todas as variedades estudadas, com maior intensidade nas etapas iniciais do processo. O aumento da temperatura favoreceu a remoção de umidade, reduzindo o tempo necessário para a aproximação ao equilíbrio de secagem. De maneira comparativa, as sementes de Cantaloupe apresentaram menor tempo para atingir o equilíbrio higroscópico, enquanto as sementes de Gália e Pele de Sapo demonstraram comportamento cinético mais lento. Essas diferenças podem estar associadas às características próprias de cada variedade, como estrutura física, composição química, espessura do tegumento e distribuição da água na matriz da semente, as quais podem influenciar os mecanismos de transferência de massa durante a secagem.

Entre os modelos descritos, os de Henderson & Pabis e Page apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, com elevados coeficientes de determinação e baixos valores dos indicadores de erro. Entretanto, o modelo de Page apresentou melhor desempenho estatístico geral, especialmente em razão dos menores valores de SSE e RMSE observados nas condições analisadas. Esse resultado evidencia que a inclusão do parâmetro n conferiu maior flexibilidade ao modelo, permitindo representar com maior precisão a curvatura da razão de umidade e o comportamento não linear da secagem das sementes.

Observando pelo ponto de vista físico-químico, os resultados indicam que a secagem das sementes de melão ocorreu predominantemente em regime de taxa decrescente, sendo controlada, sobretudo nas etapas finais, por mecanismos internos de difusão da umidade. Dessa forma, a remoção de água não ocorreu apenas por evaporação superficial, mas também pela migração da água retida na matriz biológica da semente até a superfície. Desta forma, o modelo de Page demonstrou ser o mais adequado para

representar a cinética de secagem das sementes dos melões avaliados, podendo contribuir para a predição do comportamento higroscópico e para o dimensionamento de processos de secagem mais eficientes.

Portanto, a pesquisa contribui para ampliar as informações sobre a secagem de sementes de melão, especialmente das variedades Gália, Cantaloupe e Pele de Sapo, ainda pouco abordadas em estudos específicos de modelagem matemática. Considerando que essas sementes são frequentemente descartadas durante o consumo e o processamento do fruto, podendo ser tratadas como resíduos ou subprodutos vegetais, os resultados obtidos reforçam a importância de estratégias voltadas ao seu aproveitamento, conservação e valorização. Além disso, o estudo evidencia a relevância da modelagem matemática como ferramenta de apoio à análise, otimização e controle de processos de secagem de sementes e outros produtos agrícolas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é possível sugerir novos estudos sobre a secagem das sementes de melão por meio da avaliação de novas condições operacionais, como diferentes velocidades do ar de secagem, espessuras de camada e faixas adicionais de temperatura. Também elaborando a aplicação de outros modelos matemáticos, incluindo modelos difusivos e semiteóricos, a fim de comparar sua capacidade de representação em relação aos modelos empíricos utilizados neste estudo.

É recomendado realizar análises físico-químicas e fisiológicas das sementes após a secagem, incluindo avaliação de teor de óleo, proteínas, fibras, atividade de água e germinação. Essas análises podem contribuir para verificar de forma mais ampla os efeitos da temperatura sobre a qualidade final das sementes, permitindo associar o desempenho da secagem não apenas à remoção de umidade, mas também à preservação das propriedades do material.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Raphael Lucas Jacinto *et al.* Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, e27932316, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/download/2316/1877>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- ALMEIDA, Raphael Lucas Jacinto *et al.* Cinética de secagem de sementes de melão descrita por um modelo de difusão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 5, e32953146, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/3146/2633/14614>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- ALVES, Jordana dos Santos. **Modelagem matemática de secagem da casca de abóbora moranga (*Cucurbita maxima*)**. 2019. 25 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde – GO, 2019.
- ARANHA, A. S. *et al.* **Cartilhas de secagem e armazenamento de grãos**. In: OLIVEIRA, P. C. (org.). Santarém, Pará: UFOPA, 2023. 109 p. Disponível em: <https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- ARAÚJO JUNIOR, Bernardo Bezerra de. **Estimativa do número de repetições e medidas de precisão em experimentos com melão**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Mossoró – RN, 2020. Disponível em: <https://bibliotecas.ufersa.edu.br/produtos/rd/>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- BARROS, Leonardo de Oliveira. **Estudo da cinética de secagem de semente de abóbora kabocha (*Tetsukabuto*) utilizando a ferramenta MATLAB**. 45 f. 2023. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2023. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34278>. Acesso em: 12 maio. 2026.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: **The AVI Publishing Company**, 1992. 450 p.
- CELESTINO, Sonia Maria Costa. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, 276).
- CORRÊA, P. C. *et al.* Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/79SMDYrqZKTW7rYfYx5p5GN/?lang=pt>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- COSTA, L. M. *et al.* Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1089–1096, 2011.

COSTA, Renato da Silva; SILVA, D. **Farinhas de sementes de melão neve (*Cucumis melo* sp.) produzidas por secagem intermitente e contínua: propriedades físico-químicas e estabilidade durante o armazenamento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande – PB, 2019.

DIAMANTE, L. M.; IHBIS, R.; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 1956-1962, 2010.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 3, p. 349-359, 2004.

FARIAS, Vera Solange de Oliveira *et al.* Comportamento da secagem de sementes de melão (*Cucumis melo* L.) em camada fina usando modelos empíricos. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2018, Maceió. **Anais [...]** Maceió: CONFEA, 2018.

GOIS, Clara Alana Rocha Santos. **Produtividade e qualidade dos frutos de cultivares de melão submetidos a diferentes doses de bioestimulantes.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Mossoró – RN, 2016. Disponível em: <https://bibliotecas.ufersa.edu.br/produtos/rd/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção Agrícola Municipal: Culturas temporárias e permanentes.** Rio de Janeiro: IBGE, v. 51, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/melao/br>. Acesso em: 12 nov. 2025.

KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 891-898, 2010.

KHALIL, H. M. *et al.* Activation energy of the moisture diffusion coefficient of foods. **Journal of Food Science, Chicago**, v. 54, n. 6, p. 1500-1502, 1989.

LEIVA, D. R.; CRNKOVIC, P. M.; SANTOS, A. M. Thermoanalytical study of the drying of biological materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 86, n. 1, p. 111-115, 2006.

LORENZETTI, Juarez. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas.** Material didático do curso básico de secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/588395459/Secagem-e-Armazenagem-de-Produtos-Agricolas-Juarez>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MACHADO, Gustavo de Lima. **Equilíbrio higroscópico de sementes de gergelim.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Campus Universitário de Cáceres, Cáceres – MT, 2016.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pre-dried young coconut. **Drying Technology**, v. 21, n. 9, p. 1759-1780, 2003. DOI: 10.1081/DRT-120025507.

MALACRIDA, C. R. *et al.* Composição química e potencial antioxidante de extratos de sementes de melão amarelo em óleo de soja. **Revista Ciência Agronômica, Fortaleza**, v. 38, n. 4, p. 372-376, out./dez. 2007.

MARTINS, A. F. **Herança da resistência do acesso de meloeiro AG-15591 (Ghana) à *Macrophomina phaseolina***. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Mossoró – RN, 2021. Disponível em: <https://bibliotecas.ufersa.edu.br/produtos/rd/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MEDEIROS, Ingrid Castelle Conceição. **Elaboração e caracterização de cookie produzido com farinha de semente de melão (*Cucumis melo L.*)**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Centro de Ciências da Saúde, João Pessoa – PB, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/11285>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MEDEIROS, Raquel Alves de. **Otimização e simulação do processo de secagem de sementes de melão (*Cucumis melo L.*) usando modelos matemáticos empíricos e difusivos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia, Cuité – PB, 2021. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/18995>. Acesso em: 5 dez. 2025.

MUNIZ, M. F. B. *et al.* Comparação entre métodos para avaliação da qualidade fisiológica e sanitária de sementes de melão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, n. 2, p. 144–149, 2004.

NOGUEIRA, Jocielle Cristine Alves. **Obtenção da energia de ativação, a partir da equação de Arrhenius, envolvida na degradação térmica e catalítica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, Unidade Acadêmica de Biologia e Química, Cuité – PB, 2024. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/36118>. Acesso em: 12 dez. 2025.

OLIVEIRA, F. I. C. *et al.* **A cultura do melão**. In: FIGUEIRÊDO, M. C. B.; GONDIM, R. S.; ARAGÃO, F. A. S. Produção de melão e mudanças climáticas: sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Cap. 1, p. 17-31.

OLIVEIRA, G. H. H. **Difusividade efetiva e propriedades termodinâmicas do café durante o processo de secagem**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

OLIVEIRA, J. A.; ROSA, S. D. V. F. da; CARVALHO, E. R. **Secagem de sementes**. In: OLIVEIRA, J. A. (org.). *Processamento pós-colheita de sementes: abordagem agrônômica visando aprimorar a qualidade*. Lavras-MG: UFLA, 2021. p. 67-93. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1149095>. Acesso em: 10 dez. 2025.

PARK, K. J. *et al.* Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Campinas: CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.

PEREIRA, Joan Carlos Alves. **Descrição da secagem contínua e intermitente de pedaços de melão cortados na forma de paralelepípedos pré-tratados osmoticamente**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande – PB, 2023.

PEREIRA, Maria Tereza Lucena *et al.* Modelagem matemática da secagem da casca do melão amarelo (*Cucumis melo L.*). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 54935–54946, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n6-070.

PEREIRA, R. *et al.* Mathematical modeling and determination of effective diffusivity of mesquite during convective drying. **American Journal of Plant Sciences**, v. 7, n. 6, p. 814–823, 2016.

POLEGATO, Guilherme de Sousa. **Secagem e reidratação de fatias de maçã**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Medianeira – PR, 2023. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/32514>. Acesso em: 6 fev. 2026.

RODRIGUES, Danyla Coelho. **Influência de substratos na emergência e desenvolvimento de plântulas de melão**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal do Sertão Pernambucano – IF Sertão-PE, Campus Petrolina Zona Rural, Petrolina – PE, 2018.

SACILIK, K.; ELICIN, A. K. A mathematical model of thin layer drying of organic agricultural products. **Journal of Food Engineering**, v. 73, n. 2, p. 150-159, 2006.

SANTOS, Julia Souza; DI DOMENICO, Camila Nicola Boeri. Modelagem matemática do processo de secagem solar de abacaxi. In: **WORKSHOP DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – WCTI**, VII., 2023, Francisco Beltrão. Francisco Beltrão – PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2023.

SILVA, Isneider Luiz *et al.* Secagem e difusividade de sementes de melão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 309-315, 2018.

SILVA, V. M. A. *et al.* **Coleção Grãos & Sementes: Estudos Avançados v.1**. Campina Grande: EPTEC, 2021. 70 p.

SOARES, D. S. C. *et al.* Avaliação dos modelos de processos de secagem da jabuticaba *in natura* com o uso de indicadores de desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (COBEQ), XXI., 2016, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza – CE, 2016.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H. I. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v. 26, n. 5, p. 457-465, 2001.

YANG, Z. *et al.* A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp) seeds. **Food and Bioprocess Processing**, v. 91, n. 4, p. 381-388, 2013.