

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM CONVENCIONAL DE GRÃOS DE MILHO

V. H. Correa¹, J. L. B. Fafarão², A. C. R. Aranha², D. T. Vareschini²

¹Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Brasil (pg56105@uem.br)

² Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Brasil

A secagem constitui uma etapa essencial na pós-colheita de grãos de milho, contribuindo para a redução da umidade e para a manutenção da qualidade durante o armazenamento. Neste trabalho, objetivou-se modelar matematicamente a cinética de secagem convencional do milho nas temperaturas de 45, 55 e 65°C, avaliando a capacidade preditiva de diferentes modelos. Os resultados indicaram que Midilli-Kucuk, Dois Termos e Henderson e Pabis apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais.

Palavras-chave: secagem; milho; modelagem; cinética; ajuste.

INTRODUÇÃO

O setor agroindustrial desempenha papel estratégico na segurança alimentar mundial e na economia agrícola, sendo a produção de grãos uma atividade essencial para o abastecimento alimentar e para diversos segmentos industriais. Entre os principais grãos cultivados, o milho (*Zea mays* L.) destaca-se pelo elevado volume de produção e pela ampla utilização na alimentação humana, na nutrição animal e em processos industriais, o que lhe confere grande importância econômica em âmbito nacional e internacional (STATISTA, 2021; STATISTA, 2022; USDA, 2023). Os grãos de milho geralmente apresentam elevados teores de umidade no momento da colheita, variando entre 18 e 35%, o que torna necessária a realização da secagem para reduzir esse valor a níveis adequados para armazenamento seguro, normalmente inferiores a 14% (AN *et al.*, 2024).

Após a colheita, os grãos de milho frequentemente apresentam teores de umidade superiores aos recomendados para armazenamento seguro, condição que favorece a deterioração do produto, o desenvolvimento de microrganismos e a ocorrência de perdas de qualidade. Nesse contexto, a secagem constitui uma etapa fundamental do processo pós-colheita, pois promove a redução do teor de água a níveis adequados para a conservação e o armazenamento dos grãos, contribuindo para a manutenção de suas características físicas, químicas e nutricionais (PESKE *et al.*, 2012; YANG *et al.*, 2021; ZIEGLER *et al.*, 2021).

A secagem convencional é um dos métodos mais utilizados na pós-colheita de grãos, baseando-se na remoção da umidade por meio de fenômenos

simultâneos de transferência de calor e massa. Além de influenciar diretamente a qualidade final do produto, essa operação está entre as etapas de maior consumo energético no setor agroindustrial, tornando necessária a busca por condições operacionais mais eficientes e economicamente viáveis (KUMAR *et al.*, 2014; MUJUMDAR, 2014; JOARDDER *et al.*, 2021).

Nesse cenário, a modelagem matemática destaca-se como uma ferramenta importante para descrever a cinética de secagem e compreender os mecanismos envolvidos na transferência de calor e massa. Modelos matemáticos têm sido amplamente empregados para representar a variação da umidade ao longo do tempo e auxiliar na análise e otimização do processo. Além dos modelos clássicos baseados em equações diferenciais de ordem inteira, abordagens fundamentadas no cálculo fracionário vêm sendo investigadas devido à sua capacidade de representar fenômenos complexos e não lineares com maior precisão (NICOLIN *et al.*, 2017; ARANHA *et al.*, 2023; FERRARI *et al.*, 2023).

Diante da importância da secagem para a conservação dos grãos de milho e da necessidade de compreender o comportamento da remoção de umidade durante o processo, este trabalho tem como objetivo realizar a modelagem matemática do processo de secagem convencional de grãos de milho, e comparando o desempenho de diferentes modelos matemáticos semiempíricos na descrição da cinética de secagem e contribuir para a compreensão dos fenômenos envolvidos.

MATERIAL E MÉTODOS

Secagem do milho

A secagem dos grãos de milho foi realizada em estufa (Marca: Sterilifer; Modelo: SX CR/ 42) com circulação de ar, equipada com controle digital de temperatura, operando nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C. Essas condições experimentais foram selecionadas para investigar o efeito da temperatura sobre a cinética de secagem, uma vez que o aumento da temperatura intensifica os fenômenos de transferência de calor e massa, promovendo maior remoção de água do material ao longo do processo.

Para cada ensaio, foram utilizados aproximadamente 60,0 g de grãos de milho, distribuídos em camada delgada para favorecer a uniformidade do processo de secagem. Os experimentos foram realizados em duplicata, com tempo total de secagem de 90 minutos, sendo efetuadas pesagens periódicas das amostras (de 5 em 5 minutos) para o acompanhamento da perda de umidade ao longo do processo.

Modelos empíricos de parâmetros concentrados para a cinética de secagem contínua

Foram utilizados os modelos empíricos de cinética de secagem apresentados na Tabela 1 (Equações 1 a 8) (LEWIS, 1921; PAGE, 1949; HENDERSON, PABIS, 1961; MUJUMDAR, 1995; DIAMANTE, MUNRO, 1993; ÖZDEMİR, DEVRES, 1999; YALDIZ, ERTEKIN, 2001; YALDIZ *et al.*, 2001; HOSSAIN, BALA, 2002; MIDILLI *et al.*, 2002; AKPINAR *et al.*, 2003; MIDILLI, KUCUK, 2003; SOBUKOLA *et al.*, 2007; HII *et al.*, 2009).

Tabela 1. Modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem contínua.

Modelo	Equações	
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(1)
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(2)
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(3)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(4)
Dois Termos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(5)
Aproximação da Difusão	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(6)
Hii <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^m)$	(7)
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(8)

Na modelagem da cinética de secagem, a razão de umidade (MR) foi calculada pela relação entre a diferença do teor de umidade e o teor de umidade de equilíbrio e a diferença entre o teor de umidade

inicial e o teor de umidade de equilíbrio, conforme expresso por $(Y_s - Y_{se}) / (Y_0 - Y_{se})$. Nessa expressão, Y_0 representa o teor de umidade inicial do grão e Y_{se} corresponde ao teor de umidade de equilíbrio. Os parâmetros a , b , c , g e n referem-se aos coeficientes dos modelos avaliados, enquanto k , k_0 e k_1 representam as constantes de secagem (h^{-1}) e t corresponde ao tempo de secagem. Para o cálculo da razão de umidade, foi necessário determinar o teor de umidade de equilíbrio do produto em base seca, obtido por meio do ajuste da relação entre a temperatura e o teor de umidade de equilíbrio.

Análises estatísticas

Para avaliar o desempenho dos modelos ajustados, foram empregados os parâmetros estatísticos qui-quadrado reduzido (γ^2), erro quadrático médio (MSE) e eficiência do modelo (EF), cujas expressões são apresentadas nas Equações de 9 a 11, respectivamente.

$$\gamma^2 = \sum \frac{(Y_{s\exp} - Y_{scal})^2}{(N_0 - N_c)} \quad (9)$$

$$MSE = \sum \frac{(Y_{s\exp} - Y_{scal})^2}{N_0} \quad (10)$$

$$EF = \frac{(\sum(Y_{s\exp} - \bar{Y}_{s\exp})^2 - \sum(Y_{scal} - Y_{s\exp})^2)}{\sum(Y_{s\exp} - \bar{Y}_{s\exp})^2} \quad (11)$$

Em que N_0 representa o número de observações experimentais e N_c o número de constantes do modelo. $\bar{Y}_{s\exp}$ corresponde ao valor médio da umidade em base seca experimental.

Quanto aos critérios estatísticos utilizados para a avaliação dos ajustes, valores próximos de zero para o qui-quadrado reduzido (γ^2) e para o erro quadrático médio (MSE) indicam melhor desempenho dos modelos. Por outro lado, a eficiência do modelo (EF) apresenta melhor desempenho quando seus valores se aproximam de 1 (ARANHA *et al.*, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Secagem do milho

Os ensaios de secagem dos grãos de milho foram realizados nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C. Os perfis de umidade e as taxas de secagem em função do teor de umidade em base seca são apresentados na Figura 1, em (a) e (b), respectivamente.

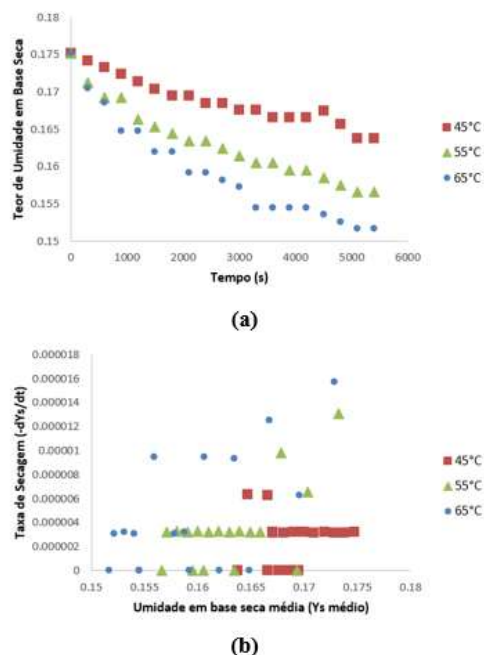


Figura 1 – (a) Perfis de umidade dos grãos de milho durante a secagem nas temperaturas de 45, 55 e 65°C; (b) Taxa de secagem em função do teor de umidade em base seca.

A partir da Figura 1, observa-se que o aumento da temperatura de secagem favoreceu a remoção de água dos grãos de milho, resultando em menores teores de umidade ao final do processo para um mesmo intervalo de tempo. Esse comportamento é característico da secagem de produtos agrícolas, uma vez que temperaturas mais elevadas intensificam os fenômenos de transferência de calor e massa, promovendo maior velocidade de evaporação da água presente nos grãos (DEFENDI *et al.*, 2016; ARANHA *et al.*, 2022).

Em relação às taxas de secagem, os maiores valores foram verificados no início do processo, quando os grãos apresentavam maior teor de umidade. À medida que a secagem prossegue, ocorre uma redução gradual da taxa de remoção de água devido à diminuição da umidade disponível e ao aumento da resistência interna à migração de água, comportamento semelhante ao relatado por Defendi *et al.* (2016) para sementes de soja submetidas a diferentes temperaturas de secagem. Dessa forma, observa-se predominância do período de taxa decrescente ao longo do processo, evidenciando a influência do teor de umidade na cinética de secagem dos grãos de milho.

Além da redução do teor de umidade, observa-se que o aumento da temperatura de secagem promoveu uma diminuição significativa do tempo necessário para atingir condições próximas ao equilíbrio. Esse comportamento ocorre em virtude do aumento da

pressão de vapor da água presente no interior dos grãos, elevando o gradiente de potencial hídrico entre o produto e o ar de secagem. Consequentemente, a difusão da umidade torna-se mais intensa, favorecendo a transferência de massa e acelerando o processo de secagem. Resultados semelhantes foram reportados por Zhang e Litchfield (1991) e An *et al.* (2024), que observaram incremento das taxas de remoção de água em grãos de milho submetidos a temperaturas mais elevadas.

A ausência de um período de taxa constante claramente definido indica que a migração interna de umidade constituiu o principal mecanismo limitante do processo. Esse comportamento é característico de materiais biológicos e produtos agrícolas, nos quais a água encontra-se associada à matriz sólida por diferentes mecanismos físicos e químicos, tornando a difusão interna o fenômeno predominante durante grande parte da secagem.

Ajuste matemático de modelos de parâmetros concentrados na secagem convencional de grãos de milho

Os modelos matemáticos descritos pelas Equações 1 a 8 foram aplicados aos dados experimentais provenientes da secagem convencional do milho. As equações dos ajustes obtidos a 45, 55 e 65°C são apresentadas nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente, ao passo que as análises estatísticas empregadas na validação dos modelos encontram-se nas Tabelas 5, 6 e 7. Para cada condição de secagem investigada, foram selecionados os modelos com maior e menor aderência aos dados experimentais, cujos ajustes são apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 para 45, 55 e 65°C, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos cinéticos para a secagem convencional do milho a 45°C.

Modelo	Parâmetros
Page	$k = 1,42E-04$; $n = 1,12$
Newton	$k = 3,45E-04$
Henderson e Pabis	$a = 1,03$; $k = 3,73E-04$
Logarítmico	$a = 1,27$; $k = 2,32E-04$; $c = -0,28$
Dois Termos	$a = 1,03$; $k_0 = 2,84E-04$; $b = -0,04$; $k_1 = -2,72E-04$
Aproximação da Difusão	$a = 0,29$; $k = 3,61E-04$; $b = 1$
Hii <i>et al.</i>	$a = 0,52$; $k = 1,19E-04$; $n = 1,14$; $c =$

	0,47; g = 1,19E-04
Midilli-Kucuk	a = 1,02; k = 1,31E-03; n = 0,78; b = -5,26E-05

Tabela 3. Ajustes dos modelos cinéticos para a secagem convencional do milho a 55°C.

Modelo	Parâmetros
Page	k = 1,42E-04; n = 1,12
Newton	k = 4,5E-04
Henderson e Pabis	a = 1,03; k = 3,73E-04
Logarítmico	a = 1,27; k = 2,32E-04; c = -0,28
Dois Termos	a = 1; k ₀ = 3,32E-04; b = -8,56E-05; k ₁ = -1,39E-03
Aproximação da Difusão	a = -4,82; k = 5,82E-04; b = 0,92
Hii <i>et al.</i>	a = 0,73; k = 1,19E-04; n = 1,14; c = 0,26; g = 1,19E-04
Midilli-Kucuk	a = 0,94; k = -1,09E-03; n = 0,80; b = -4,98E-04

Tabela 4. Ajustes dos modelos cinéticos para a secagem convencional do milho a 65°C.

Modelo	Parâmetros
Page	k = 1,42E-04; n = 1,12
Newton	k = 4,5E-04
Henderson e Pabis	a = 1,03; k = 3,73E-04
Logarítmico	a = 1,27; k = 2,32E-04; c = -0,28
Dois Termos	a = 9,99; k ₀ = 1,48E-04; b = -9,01; k ₁ = -1,32E-04
Aproximação da Difusão	a = -0,36; k = 3,65E-05; b = 6,43
Hii <i>et al.</i>	a = 1,44; k = 7,13E-04; n = 0,82; c = -0,42; g = -2,30E-04
Midilli-Kucuk	a = 0,99; k = 3,86E-04;

n = 0,95; b = -3,40E-05

Tabela 5. Análises estatísticas dos ajustes para a secagem convencional do milho a 45°C.

Modelo	γ^2	MSE	EF
Page	5,01E-07	4,48E-07	9,56E-01
Newton	5,46E-07	5,17E-07	9,49E-01
Henderson e Pabis	5,32E-07	4,76E-07	9,53E-01
Logarítmico	4,63E-07	3,90E-07	9,62E-01
Dois Termos	4,70E-07	3,71E-07	9,64E-01
Aproximação da Difusão	5,83E-07	4,91E-07	9,52E-01
Hii <i>et al.</i>	6,06E-07	4,47E-07	9,56E-01
Midilli-Kucuk	4,61E-07	3,64E-07	9,64E-01

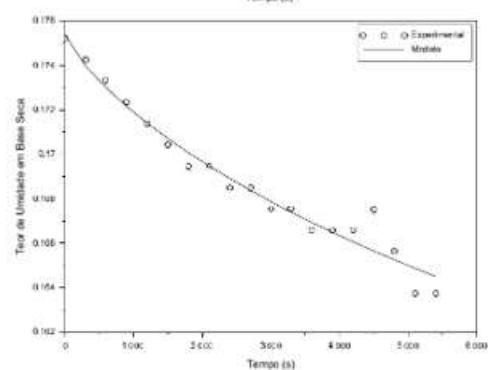
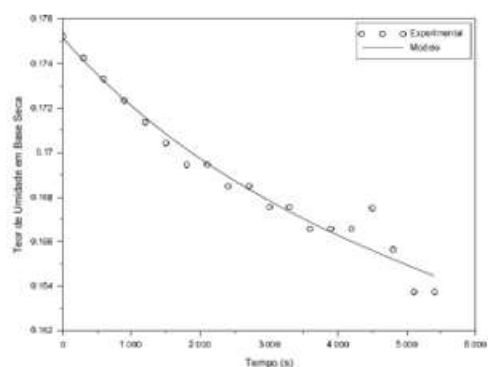
Tabela 6. Análises estatísticas dos ajustes para a secagem convencional do milho a 55°C.

Modelo	γ^2	MSE	EF
Page	1,32E-06	1,18E-06	9,54E-01
Newton	2,34E-06	2,22E-07	9,14E-01
Henderson e Pabis	1,03E-06	9,23E-07	9,64E-01
Logarítmico	1,44E-06	1,21E-06	9,53E-01
Dois Termos	1,60E-06	1,26E-06	9,51E-01
Aproximação da Difusão	1,33E-06	1,12E-06	9,57E-01
Hii <i>et al.</i>	1,57E-06	1,16E-06	9,55E-01
Midilli-Kucuk	2,12E-06	1,67E-06	9,35E-01

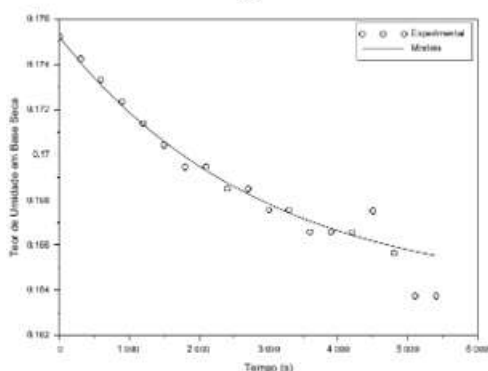
Tabela 7. Análises estatísticas dos ajustes para a secagem convencional do milho a 65°C.

Modelo	γ^2	MSE	EF
Page	2,29E-06	2,05E-06	9,53E-01
Newton	3,22E-06	3,05E-06	9,31E-01
Henderson e Pabis	1,70E-06	1,52E-06	9,65E-01
Logarítmico	2,91E-06	2,45E-06	9,44E-01

Dois Termos	3,13E-06	2,47E-06	9,44E-01
Aproximação da Difusão	3,00E-06	2,53E-06	9,42E-01
Hii <i>et al.</i>	3,16E-06	2,33E-06	9,47E-01
Midilli-Kucuk	3,21E-06	2,53E-06	9,42E-01

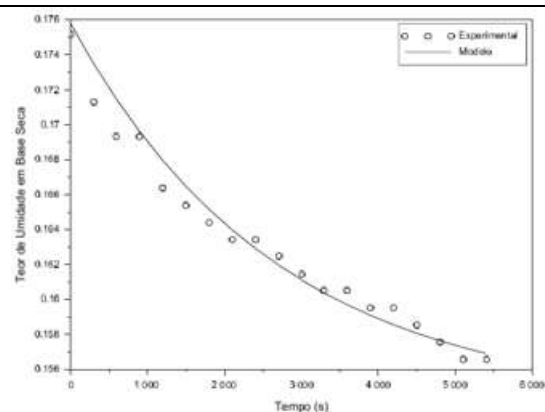


(a)

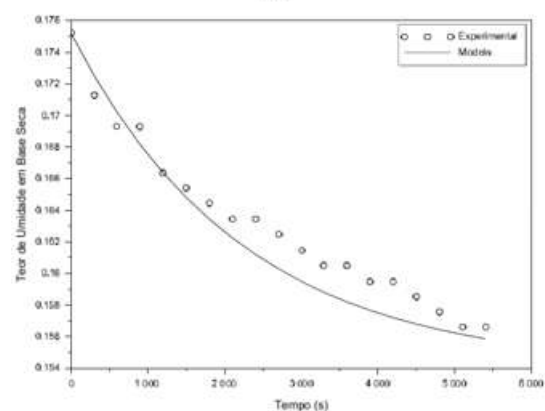


(b)

Figura 2 – Ajustes cinéticos do milho (Temperatura = 45°C): (a) maior aderência: Dois Termos e Midilli-Kucuk; (b) menor aderência: Newton.



(a)



(b)

Figura 3 – Ajustes cinéticos do milho (Temperatura = 55°C): (a) maior aderência: Henderson e Pabis; (b) menor aderência: Newton.

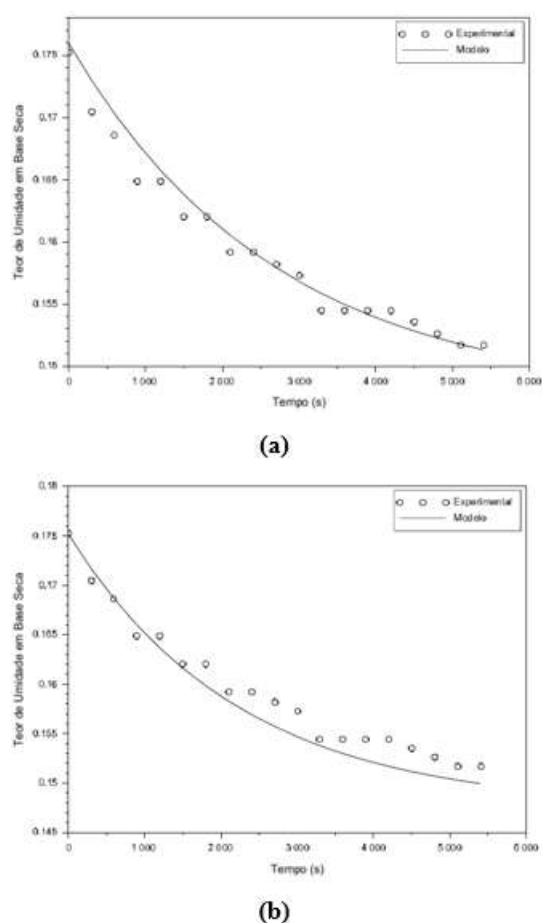


Figura 4 – Ajustes cinéticos do milho (Temperatura = 65°C): (a) maior aderência: Henderson e Pabis; (b) menor aderência: Newton.

Com base nas Tabelas 5 a 7, observa-se que os modelos Midilli-Kucuk, Dois Termos e Henderson e Pabis apresentaram melhor desempenho relativo no ajuste aos dados experimentais, indicando maior capacidade de representação da cinética de secagem do milho nas condições avaliadas. Esse comportamento está associado à maior flexibilidade estrutural desses modelos, a qual possibilita descrever com maior precisão a evolução da razão de umidade ao longo do processo, especialmente em sistemas em que diferentes mecanismos de transferência de massa podem atuar simultaneamente. Em contrapartida, o modelo de Newton apresentou o menor desempenho em todas as condições analisadas, o que pode ser atribuído à sua formulação simplificada e à limitação decorrente do uso de apenas um parâmetro ajustável, reduzindo sua capacidade de representar adequadamente a curvatura experimental da cinética de secagem (ATALAY, 2019; FOROUZANFAR *et al.*, 2020; CAO *et al.*, 2021; ROY *et al.*, 2022).

Comparando-se para cada temperatura, os modelos Midilli-Kucuk e Dois Termos apresentaram os menores valores de erro para a temperatura de 45°C, evidenciando maior capacidade de representar a curvatura experimental da cinética de secagem. Esse resultado pode ser atribuído ao maior número de parâmetros livres, que proporciona maior flexibilidade matemática para representar simultaneamente diferentes mecanismos de transporte de umidade.

Nas temperaturas de 55 e 65°C, o modelo de Henderson e Pabis apresentou os melhores indicadores estatísticos, sugerindo que o aumento da temperatura reduz a complexidade aparente do processo e favorece descrições matemáticas mais simples. Tal comportamento tem sido observado em diversos produtos agrícolas submetidos à secagem em camada fina, nos quais modelos exponenciais simples apresentam desempenho satisfatório em condições de maior intensidade térmica.

De maneira generalizada, o desempenho satisfatório do modelo de Henderson e Pabis reforça sua ampla aplicação em produtos agrícolas e materiais biológicos, uma vez que este modelo semi-empírico é frequentemente utilizado como referência em estudos de secagem em camada fina, sendo reportado na literatura como uma abordagem competitiva em diferentes condições operacionais (DOYMAZ, 2004; AKPINAR, 2006; ERBAY, ICER, 2010). Embora modelos mais complexos, como Midilli-Kucuk e Dois Termos, tendam a apresentar maior flexibilidade e melhor capacidade de ajuste global, a consistência observada para Henderson e Pabis indica sua relevância como modelo de referência para a descrição da cinética de secagem de grãos.

Os resultados obtidos neste trabalho corroboram observações reportadas na literatura para diferentes grãos e sementes agrícolas. Ferrari *et al.* (2023), ao estudarem a secagem de milho, trigo e feijão, verificaram que modelos com maior flexibilidade estrutural tendem a apresentar melhor desempenho estatístico. De forma semelhante, Defendi *et al.* (2016) observaram predominância do período de taxa decrescente durante a secagem de sementes de soja, evidenciando a influência dos mecanismos difusivos internos na remoção de água.

CONCLUSÃO

A secagem convencional dos grãos de milho apresentou forte dependência da temperatura de operação, sendo observada maior velocidade de remoção de água à medida que a temperatura foi elevada de 45 para 65°C. Os perfis experimentais evidenciaram predominância do período de taxa decrescente, indicando que a difusão interna de

umidade constituiu o principal mecanismo limitante do processo.

Os modelos matemáticos avaliados foram capazes de representar satisfatoriamente a cinética de secagem, apresentando elevados valores de eficiência e baixos erros de ajuste. Entre os modelos estudados, Midilli-Kucuk, Dois Termos e Henderson e Pabis apresentaram os melhores desempenhos estatísticos, demonstrando maior capacidade preditiva para descrever a evolução da razão de umidade durante a secagem do milho.

Os resultados obtidos evidenciam que a modelagem matemática constitui uma ferramenta importante para a análise, simulação e otimização de processos de secagem, podendo contribuir para o desenvolvimento de estratégias operacionais mais eficientes e para a redução dos custos energéticos em sistemas de pós-colheita de grãos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e à Universidade Estadual de Maringá pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AKPINAR, E. K. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modeling, performance analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 17, p. 2407–2418, 2006.
- AN, N.-N.; SUN, W.; LI, D.; WANG, L.-J.; WANG, Y. Effect of microwave-assisted hot air drying on drying kinetics, water migration, dielectric properties, and microstructure of corn. **Food Chemistry**, v. 455, p. 139913, 2024.
- ARANHA, A. C. R.; DEFENDI, R. O.; JORGE, L. M. M. Conventional and intermittent drying modeling of agricultural products: A review. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, n. 1, e14206, 2022.
- ARANHA, A. C. R.; FERRARI, A. L.; BISSARO, C. A.; MATIAS, G. S.; DEFENDI, R. O.; PASCHOAL, S. M.; JORGE, L. M. M. Mathematical modelling of wheat drying by fractional order and assessment of transport properties. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 102, n. 2, p. 996–1006, 2023.
- ATALAY, H. Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system. **Energy**, v. 172, p. 1037–1052, 2019.
- CAO, F.; ZHANG, R.; TANG, J.; LI, F.; JIAO, Y. Radio frequency combined hot air (RF-HA) drying of tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fillets: Drying kinetics and quality analysis. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 74, 2021.
- DEFENDI, R. O.; NICOLIN, D. J.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. de M. Assessment of the Initial Moisture Content on Soybean Drying Kinetics and Transport Properties. **Drying Technology**, v. 34, n.3, p. 360–371, 2016.
- DIAMANTE, L. M.; MUNRO, P. A. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. **Solar Energy**, v. 51, p. 271–276, 1993.
- DOYMAZ, I. Drying kinetics of white mulberry. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 341–346, 2004.
- ERBAY, Z.; ICER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental methods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441–464, 2010.
- FERRARI, A. L.; ARANHA, A. C. R.; NASCIMENTO, F. M.; ROMANSINA, B. C.; JORGE, L. M. M.; NICOLIN, D. J.; GOMES, M. C. S.; DEFENDI, R. O. Mathematical modeling of beans, corn and wheat drying by fractional calculus. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, n. 8, e14390, 2023.
- FOROUZANFAR, A.; HOJJATI, M.; NOSHAD, M.; SZUMNY, A. J. Influence of UV-B Pretreatments on Kinetics of Convective Hot Air Drying and Physical Parameters of Mushrooms (*Agaricus bisporus*). **Agriculture**, v. 10, n. 9, 2020.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, p. 169–174, 1961.
- HIL, C. I.; LAW, C. L.; CLOKE, M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 191–198, 2009.
- HOSSAIN, M. A.; BALA, B. K. Thin-layer drying characteristics for green chilli. **Drying Technology**, v. 20, n. 2, p. 489–505, 2002.
- JOARDDER, M. U. H.; KARIM, A.; GHNIMI, S. Retaining quality when drying food: challenges and solutions. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 2021.
- KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48–57, 2014.
- LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. **Industrial & Engineering Chemistry**, v.13, p. 427–432, 1921.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 1111–1122, 2003.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4 ed. CRC Press, 2014.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. v. 1. New York: Marcel Dekker, 1995.

NICOLIN, D. J.; DEFENDI, R. O.; ROSSONI, D. F.; JORGE, L. M. DE M. Mathematical modeling of soybean drying by a fractional-order kinetic model. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, 2017.

ÖZDEMİR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 225-233, 1999.

PAGE, G. **Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer**. 1949. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Purdue, West Lafayette, 1949.

PESKE, S. T.; VILLELA, F. A.; MENEGHELLO, G. E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3. ed. Pelotas: Editora UFPel, 2012.

ROY, M.; BULBUL, A. I.; HOSSAIN, M. A.; SHOUROVE, J. H.; AHMED, S.; SARKAR, A.; BISWAS, R. Study on the drying kinetics and quality parameters of osmotic pre-treated dried Satkara (*Citrus macroptera*) fruits. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 16, p. 471-485, 2022.

SOBUKOLA, O. P.; DAIRO, O. U.; ODUNEWU, A. V. Convective hot air drying of blanched yam slices. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 43, p.1233-1238, 2007.

STATISTA. **Brazil: grain crops planted area 2020-2021, by type**. [2022]. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/740069/area-planted-grain-crops-type-brazil/>>. Acesso em: 29 mar. 2026.

STATISTA. **Grain production worldwide 2020/21, by type**. [2021]. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>>. Acesso em: 29 mar. 2026.

USDA. **Brazil: Grain and Feed Update**. [2023] Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain%20and%20Feed%20Update_Brasilia_Brazil_BR2023-0028>. Acesso em: 29 mar. 2026.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. **Drying Technology**, v. 19, p. 583-596, 2001.

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

YANG, M.-D.; HSU, Y.-C.; TSENG, W.-C.; LU, C.-Y.; YANG, C.-Y.; YANG, C.-H.; LAI, M.-H.; WU, D.-H. Assessment of Grain Harvest Moisture Content Using Machine Learning on Smartphone Images for Optimal Harvest Timing. **Sensors**, v. 21, n. 17, 5875, 2021.

ZHANG, Q.; LITCHFIELD, J. B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. **Drying Technology**, v. 9, p. 383-395, 1991.

ZIEGLER, V.; PARAGINSKI, R. T.; FERREIRA, C. D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality: a review. **Journal of Stored Products Research**, v. 91, 2021.