ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA POLPA DE GRAVIOLA UTILIZANDO O MÉTODO DE CAMADA DE ESPUMA

Ana Thayná Dutra[1], Claudinéia Aparecida Queli Geraldi [2], Sumaya Ferreira Guedes[3], Raquel Aparecida Loss[4], Tulio Klassen[5]

[1]Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Nova Mutum, Brasil
(ana.thayna.dutra@unemat.br)
[2] Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Nova Mutum, Brasil
[3] Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Nova Mutum, Brasil
[4] Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Cáceres, Brasil
[5]Escola Cenecista Hilda Strenger Ribeiro (CNEC), Nova Mutum, Brasil

Resumo: A secagem em camada de espuma é uma técnica amplamente utilizada para aumentar a estabilidade de polpas de frutas. Este estudo teve como objetivo avaliar a cinética de secagem da polpa de graviola (Annona muricata L.) por meio de modelagem matemática. As espumas foram secas a 60, 70 e 80 °C, e os dados experimentais ajustados a diferentes equações. Os melhores ajustes foram obtidos pelos modelos com maiores coeficientes de determinação e menores erros, destacando-se o modelo de Page.

Palavras-chave: *Curvas; modelos matemáticos; polpa de fruta*

INTRODUÇÃO

A espécie Annona muricata L., conhecida como graviola, é uma frutífera tropical amplamente cultivada em regiões de clima quente e úmido, incluindo América Latina, Caribe, África e Sudeste Asiático, sendo reconhecida por sua relevância científica e tecnológica. Seu interesse decorre, principalmente, da composição química rica em compostos bioativos, como fenólicos, acetogeninas e vitamina C, os quais estão associados a propriedades antioxidantes e funcionais. Em razão dessas características, a fruta apresenta potencial promissor para aplicações na indústria de alimentos e no desenvolvimento de produtos nutracêuticos (LOPES et al., 2023; MORAIS et al., 2022).

Do ponto de vista econômico e tecnológico, a graviola apresenta elevada perecibilidade pós-colheita, característica que limita sua comercialização in natura e reforça a importância de tecnologias de conservação. Os processos de secagem e desidratação contribuem para o prolongamento da vida útil, preservação de compostos bioativos e desenvolvimento de produtos com maior valor comercial, favorecendo a inserção da fruta em cadeias produtivas de alimentos funcionais e ingredientes naturais (GARCIA et al., 2022; KUMAR; PRASAD; SINGH, 2022).

A secagem é amplamente reconhecida como uma das principais operações unitárias aplicadas à conservação de frutas, pois reduz a atividade de água e retarda reações microbiológicas e enzimáticas, preservando nutrientes e compostos bioativos quando conduzida sob condições controladas (ERBAY; İCİER, 2021; DAS; ARORA; SINGH, 2022). Tecnologias modernas de secagem vêm sendo desenvolvidas com foco simultâneo na eficiência energética e na manutenção da qualidade físico-química e sensorial dos alimentos, destacando-se métodos voltados a matrizes líquidas e semilíquidas, como polpas e sucos (SANTOS et al., 2024).

O processo geralmente ocorre em temperaturas moderadas frequentemente entre 50 °C e 80 °C e envolve três etapas principais: formação da espuma, espalhamento em camada fina e secagem convectiva. Após a remoção da umidade, o material seco é triturado, originando um pó com alta solubilidade e capacidade de reidratação, características desejáveis para aplicações industriais (SILVA et al., 2023).

Do ponto de vista tecnológico, a secagem em camada de espuma apresenta vantagens relevantes, como menor consumo energético, melhor preservação de compostos sensíveis ao calor e obtenção de pós com elevada porosidade e estabilidade físico-química. Esses benefícios estão diretamente relacionados à microestrutura aerada formada durante a espumação, que reduz a resistência difusiva ao vapor e acelera a cinética de secagem (KUMAR; PRASAD; SINGH, 2022).

Os parâmetros operacionais como temperatura do ar, espessura da camada, tipo e concentração de agente espumante exercem influência significativa sobre o tempo de secagem e sobre as propriedades físicas, nutricionais e sensoriais do produto final, evidenciando a importância da otimização dessas variáveis para obtenção de pós de alta qualidade (OLIVEIRA et al., 2023).

Este trabalho teve como objetivo determinar a cinética de secagem em diferentes temperaturas, identificar o modelo matemático que melhor representa o processo de secagem em camada de espuma da polpa de graviola.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Química da Universidade do Estado de Mato Grosso, campus de Nova Mutum – MT. Para a realização das análises, foram utilizadas polpas de graviola (Annona muricata L.) adquiridas junto a produtores rurais locais (feirantes).

As polpas foram trituradas em liquidificador (marca Britânia Diamante 800) até completa homogeneização. Para a formação da espuma, foi adicionado o emulsificante comercial Emustab® (composto por monoglicerideos de ácidos graxos, monoestearato de sorbitana, polioxietileno e sorbato de potássio) na concentração de 5% (m/m), em relação à massa da polpa. A mistura foi submetida à agitação em batedeira (marca Arno Girando Chrome), em velocidade máxima, até a obtenção de espuma estável e com adequada incorporação de ar.

Após a formação da espuma, amostras de 10 g foram distribuídas em camada fina e uniforme sobre placas de Petri. O processo de secagem foi realizado em estufa com circulação e renovação forçada de ar, nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C. As massas das amostras foram determinadas em intervalos regulares de 15 minutos, utilizando-se balança analítica marca Cienlab® com precisão de 0,0001 g. Os ensaios foram conduzidos até que as amostras atingissem condições de equilíbrio, caracterizadas pela obtenção de massa constante.

A razão de umidade (RU) foi determinada a partir dos valores de massa obtidos durante o processo de secagem, conforme equação 01.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_e - U_e} \qquad (01)$$

Sendo: U – teor de água do produto, decimal b.s.; Ui – teor de água inicial do produto, decimal b.s.; Ue – teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

Os modelos matemáticos de Henderson e Pabis (1962), Page (1949) e Midilli e Kucuk (2002), foram ajustados aos dados experimentais. Esses modelos são amplamente utilizados na literatura com o intuito de predizer o fenômeno da secagem de produtos agrícolas (SANTOS et al., 2010; GONELI et al.,2014; LEITE et al.,2015).

A utilização de modelos matemáticos na descrição da cinética de secagem permite compreender o comportamento da remoção de umidade do produto ao longo do tempo, além de auxiliar na previsão do processo em diferentes condições de operação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas da razão de umidade (RU) da polpa de graviola submetida à secagem em camada de espuma, nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, estão apresentadas na Figura 1. Observa-se que o aumento da temperatura promoveu uma redução significativa no tempo necessário para atingir o equilíbrio higroscópico, evidenciando uma maior taxa de remoção de água do material. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento do gradiente térmico entre o ar de secagem e a amostra, o que intensifica os mecanismos de transferência de calor e massa, favorecendo a evaporação da água. Além disso, temperaturas mais elevadas contribuem para a redução da resistência interna à difusão da umidade, acelerando o processo de secagem.

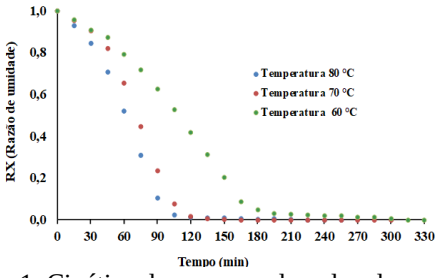

Figura 1. Cinética de secagem da polpa de graviola em função da temperatura.

Observa-se, a partir da Figura 1, que o tempo necessário para a secagem da polpa de graviola variou em função da temperatura aplicada, sendo aproximadamente de 165, 180 e 315 minutos para as temperaturas de 80, 70 e 60 °C, respectivamente. Esse comportamento evidencia que o aumento da temperatura de secagem promove a redução do tempo necessário para a remoção de umidade, em razão do incremento na taxa de transferência de calor e massa, o que acelera o processo de evaporação da água presente no material.

Comportamento semelhantes foram observados por Baptestini et al. (2015), ao estudarem a secagem em camada de espuma da polpa de graviola, verificando que o aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo de secagem, sendo necessário 1035 minutos a 40 °C e apenas 225 minutos a 80 °C, evidenciando que temperaturas mais elevadas promovem maior taxa de remoção de água.

A modelagem matemática foi realizada com o objetivo de descrever o comportamento cinético do processo de secagem e identificar o modelo que melhor se ajusta

aos dados experimentais nas diferentes temperaturas avaliadas. Os dados de razão de umidade (RU), obtidos ao longo da secagem da polpa de graviola, foram ajustados aos modelos matemáticos de Henderson e Pabis, Page e Midilli e Kucuk. Os parâmetros obtidos e os indicadores de ajuste estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 2 - Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados para a cinética de secagem da polpa de graviola nas temperaturas de 80, 70 e 60 °C.

Modelo	Parâmetro	80 °C	70 °C	60 °C
Handerson e Pabis	A	1,000000	1,000000	1,000000
	k (min^{-1})	0,021155	0,018717	0,012046
	N	0,000000	0,000000	0,000000
	Coeficiente de determinação R	0,953274	0,929722	0,950175
	Erro	1,539857	1,883728	2,563952
Midilik e Kucuk	A	1,000000	1,000000	1,000000
	k (min^{-1})	0,000017	0,000045	0,000142
	N	2,575838	2,307873	1,837399
	Coeficiente de determinação R	0,998588	0,995589	0,995121
	Erro	0,301570	0,379619	0,654826
Page	k (min^{-1})	0,000017	0,000018	0,000088
	N	2,600064	2,511902	1,934004
	Coeficiente de determinação R	0,998655	0,997573	0,996067
	Erro	0,245648	0,283256	0,552833

Fonte: Elaborada pelos autores

A modelagem matemática do processo de secagem de produtos agrícolas tem sido amplamente investigada, sendo utilizada como ferramenta para descrever e predizer os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos. No presente estudo, os modelos de Page e de Midilli e Kucuk apresentaram ajuste satisfatório aos dados experimentais, evidenciado pelos elevados coeficientes de determinação e baixos valores de erro médio.

Para o modelo de Midilli e Kucuk, os valores de R^2 variaram entre 0,998588, 0,995589 e 0,995121, enquanto os erros médios oscilaram entre 0,301570, 0,379619 e 0,0,654826, para as temperaturas de 80, 70 e 60 ºC, respectivamente, indicando elevada capacidade desse modelo em descrever a cinética de secagem da polpa de graviola.

De forma semelhante, o modelo de Page também apresentou elevado coeficiente de determinação, com valores variando de 0,998655, 0,997573 e 0,996067, e erros médios entre 0,245648, 0,283256 e 0,552833, para as temperaturas de 80, 70 e 60ºC, demonstrando boa concordância entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo. O modelo de Page apresenta menor número de parâmetros, sendo composto apenas pelas constantes k e n, enquanto o modelo de Midilli e Kucuk possui maior complexidade matemática, envolvendo os parâmetros a, k e n. Essa característica torna o modelo de Page mais simples para aplicação e interpretação, mantendo, ainda assim, elevada capacidade de ajuste aos dados experimentais.

No trabalho realizado por Riguetto et al., (2018) em secagem de camada de espuma da polpa de uvaia também obtiveram valores semelhantes e os modelos que apresentaram os melhores ajustes foram o de Midilli e Kucuk e Page.

Já o modelo de Henderson e Pabis não apresentou um ajuste satisfatório aos dados experimentais da secagem da polpa de graviola em camada de espuma, não sendo indicado para representar a cinética de secagem em nenhuma das temperaturas estudadas. Apresentando coeficientes de determinação igual ou inferior a 0,953274 em todas as temperaturas em estudo. Os valores dos erros médios variaram de 1,539857 a 2,563952, indicando menor capacidade de descrever adequadamente o comportamento da secagem da polpa de graviola nas condições estudadas.

CONCLUSÃO

A aplicação da modelagem matemática à cinética de secagem da polpa de graviola evidenciou diferenças significativas no desempenho dos modelos avaliados. Os modelos de Page e de Midilli e Kucuk apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais, caracterizado por elevados coeficientes de determinação e baixos erros médios, indicando adequada representatividade do comportamento do processo. Entre eles, o modelo de Page destacou-se pela maior simplicidade e menor número de parâmetros, o que favorece sua aplicação em análises de secagem. Em contrapartida, o modelo de Henderson e Pabis não representou de forma satisfatória a cinética de secagem do material, apresentando menor aderência aos dados experimentais.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Mato Grosso pela concessão da bolsa de Iniciação científica.

REFERÊNCIAS

Baptestini, F. M. et al. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 12, p. 1203–1208, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1203-1208

Das, I.; Arora, S.; Singh, R. Drying technologies for food products: reducing energy consumption and improving quality. Journal of Food Process Engineering, v. 45, n. 5, e13953, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpe.13953

Erbay, Z.; İçier, F. A review of thin-layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 61, n. 2, p. 292–310, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1725913

Garcia, L. G.; Santos, M. R.; Oliveira, A. C.; Souza, P. R.; Lima, J. F. Drying kinetics and quality parameters of soursop pulp powder obtained by convective drying. Journal of Food Science and Technology, v. 59, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-022-05345-6

GONELI, André Luiz Dias; CORRÊA, Paulo Cesar; RESENDE, Osvaldo; RIBEIRO, Danilo Alves. Drying kinetics of castor bean fruits. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 36, n. 3, p. 299–306, 2014. DOI: https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i3.16398

Kumar, R.; Prasad, K.; Singh, A. Foam-mat drying: a review of process variables and product quality. Journal of Food Processing and Preservation, v. 46, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpp.16536

LEITE, Guilherme André; SILVA, Wellington da; LIMA, Aldenir Feitosa dos Santos; SOUZA, Renato Rodrigues de. Thin-layer drying kinetics of agricultural products: modeling and evaluation. Journal of Food Processing and Preservation, v. 39, n. 6, p. 1567–1576, 2015. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpp.12374

Lopes, A. S.; Pereira, L. M.; Costa, R. F.; Almeida, J. P.; Silva, E. O. Functional and nutritional properties of soursop fruit and derivatives. Plants, v. 12, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12010123

Morais, D. R.; Santos, G. G.; Oliveira, V. C.; Costa, A. L.; Ferreira, M. S. Bioactive compounds and antioxidant potential of Annona muricata pulp. Journal of Food Composition and Analysis, v. 105, 104245, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104245

Oliveira, M. I.; Souza, R. L.; Barbosa, F. S.; Lima, C. A.; Pereira, D. S. Influence of foaming agents and temperature on foam-mat drying kinetics of fruit pulps. Journal of Food Measurement and Characterization, v. 17, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11694-023-01876-5

RIGUETO, C. V. T.; EVARISTO, L. M.; GERALDI, C. A. Q.; COVRE, L. Influência da temperatura de secagem de uvaia (Eugenia pyriformis) em camada de espuma. ENGEVISTA, v. 20, n. 4, p. 537–547, out. 2018.

Santos, P. H. S.; Oliveira, A. L.; Costa, J. M.; Silva, M. A.; Ferreira, T. A. Advances in drying technologies applied to fruit pulps and by-products. Food Reviews International, v. 40, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2189456

SANTOS, M. L. dos; QUEIROZ, A. J. de M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Drying kinetics of agricultural products: modeling and evaluation. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 10, p. 1080–1086, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001000013

Silva, L. R.; Barbosa, F. S.; Lima, C. A.; Souza, R. L.; Oliveira, M. I. Foam-mat drying of tropical fruit pulps: physicochemical and functional properties of powders. LWT - Food Science and Technology, v. 168, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113905