



AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA POLPA DE TOMATE EM CAMADA DE ESPUMA

Arthur Vitorassi Figueiredo Santos¹, Claudinéia Aparecida Queli Geraldi², Sumaya Ferreira Guedes³, Fernanda Lourenço Dipple⁴ Raquel Aparecida Loss⁵

¹Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Nova Mutum, Brasil
(vitorassi.arthur@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), Nova Mutum, Brasil

⁵ Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Cáceres, Brasil

Resumo: A conservação de polpas de frutas pode ser favorecida pela secagem em camada de espuma, técnica que reduz o teor de umidade e aumenta a estabilidade do produto. Este estudo avaliou a cinética de secagem da polpa de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) por meio de modelagem matemática. As espumas foram secas a 60, 70 e 80 °C, e os dados experimentais ajustados a diferentes modelos, destacando-se o modelo de Page pelo melhor desempenho estatístico.

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

INTRODUÇÃO

O tomate (*Solanum lycopersicum*) é uma hortaliça de grande importância econômica e nutricional. Segundo Bissacotti, Londero e Costabeber (2021), o tomate apresenta características botânicas bem definidas, sendo originário da América do Sul e, no Brasil, destaca-se pelo seu alto valor funcional, por conter substâncias bioativas que promovem a saúde humana (BISSACOTTI; LONDERO; COSTABEBER, 2021).

O tomate é composto predominantemente por água (aproximadamente 94–95%), enquanto a fração sólida é formada principalmente por açúcares, ácidos orgânicos, sólidos solúveis, vitaminas, minerais e compostos bioativos, como carotenoides e fenólicos (Lima et al., 2022). Também apresenta carotenóides, especialmente o licopeno, que são moléculas com potencial antioxidante (DAVIS; FISH; PERKINS-VEAZIE, conforme citado em revisão sobre cultivo de tomate). Além disso, a biodisponibilidade do licopeno varia conforme vários fatores: forma de apresentação do alimento, processamento, presença de gordura na refeição, entre outros (MORITZ; TRAMONTE, 2023).

A secagem é uma das técnicas mais tradicionais de conservação de alimentos, usada desde tempos antigos para estender a vida útil dos produtos ao remover a água livre, fator essencial para o crescimento microbiano e reações de deterioração. Conforme relatado pela Embrapa, ao reduzir o teor de umidade, cria-se um ambiente menos favorável para

microrganismos, o que ajuda a preservar o alimento por mais tempo, além de reduzir custos de transporte e armazenamento, já que o alimento seco pesa e ocupa menos espaço (CORNEJO; NOGUEIRA; WILBERG, 2003).

Entretanto, nem todos os métodos de secagem são iguais: pode-se distinguir entre secagem natural (ao sol) e métodos artificiais, cada qual com vantagens e limitações. A secagem natural constitui um dos métodos mais simples e econômicos de desidratação, sendo amplamente empregada em regiões com elevada incidência de radiação solar. Entretanto, por ocorrer em ambiente aberto, o processo está mais sujeito à contaminação por poeira, insetos, aves e microrganismos, além da influência das condições climáticas, o que pode comprometer a qualidade e a segurança do produto (EL-MESERY et al., 2022).

Por outro lado, a secagem por ar quente permite maior controle dos parâmetros operacionais, como temperatura, velocidade e umidade do ar, possibilitando a obtenção de produtos com teor de umidade adequado e características de qualidade mais uniformes, além de favorecer o desempenho durante a reidratação (WANG et al., 2023).

Do ponto de vista da modelagem matemática, os modelos de secagem em camada fina têm sido amplamente empregados para descrever e prever a cinética de remoção de umidade em produtos agrícolas e alimentícios. Esses modelos, que incluem abordagens empíricas, semiteóricas e teóricas,



constituem ferramentas importantes para a estimativa das taxas de secagem, da difusividade efetiva e das alterações estruturais do material durante o processo, além de subsidiarem o dimensionamento e a otimização de sistemas de secagem (BUZRUL, 2022). Esses modelos são fundamentais para otimizar as operações industriais, ajustando tempos e condições para minimizar perdas de qualidade.

A evolução das tecnologias de secagem tem possibilitado o desenvolvimento de métodos capazes de preservar compostos bioativos termossensíveis, superando algumas limitações dos processos convencionais. Entre as tecnologias emergentes destacam-se a secagem por micro-ondas, radiofrequência, infravermelho, ultrassom, plasma frio e liofilização, as quais apresentam maior potencial para a retenção de compostos fenólicos, flavonoides, vitaminas e outros constituintes funcionais em alimentos de origem vegetal desidratados (SANTOS et al., 2025). Essas inovações possibilitam conservar não apenas a estrutura física, mas também partes nutricionais valiosas, o que é crucial para alimentos funcionais.

Por fim, um aspecto importante da conservação por secagem refere-se aos seus efeitos sobre a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos. Estudos demonstram que tecnologias emergentes de secagem promovem menor degradação da cor, do sabor, do aroma e de compostos bioativos quando comparadas aos métodos convencionais, contribuindo para o aumento da vida útil e para a manutenção das propriedades funcionais de frutas, hortaliças e ervas aromáticas (CALÍN-SÁNCHEZ et al., 2020).

A secagem de tomate por camada de espuma (foam-mat drying) tem sido destacada por proporcionar uma estrutura porosa que acelera a remoção de umidade e reduz o tempo de secagem em comparação com métodos convencionais. No estudo de Fernandes et al. (2013), ao utilizar albumina como agente espumante e controlar o tempo de batimento, observou-se que a densidade da espuma diminuiu e a estabilidade térmica aumentou, resultando numa secagem mais rápida e eficiente, especialmente a 60 °C e 80 °C (FERNANDES; QUEIROZ; BOTREL; et al., 2013). Essa porosidade favorece a difusão da água, tornando o processo mais eficaz e menos agressivo ao produto.

Além disso, a otimização dos parâmetros de formulação da espuma como a concentração de aglutinantes (por exemplo, albumina de ovo, carboximetilcelulose) e a temperatura de secagem — é crucial para garantir uma boa qualidade do pó final de tomate. Hossain, Ahmed e Ferdaus (2024) utilizaram a metodologia de superfície de resposta para maximizar a estabilidade da espuma (atingindo até cerca de 89 %) e minimizar a densidade, encontrando uma combinação ótima de 4,59% de

albumina de ovo, 0,70% de CMC e 60 °C como temperatura de secagem (HOSSAIN; AHMED; FERDAUS, 2024). Essas condições permitiram preservar o teor de compostos bioativos, como a vitamina C, e gerar um pó de tomate esteticamente e funcionalmente interessante.

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

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 tomate adquiridas no comércio local.

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 monoglicerídeos de ácidos graxos, monoestearato de sorbitana, polioxietileno e sorbato de potássio) na concentração de 4% (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 (RX) foi determinada a partir dos valores de massa obtidos durante o processo de secagem, conforme equação 01.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_e - X_e} \quad (01)$$

Sendo: X – teor de água do produto, decimal b.s.; X_i – teor de água inicial do produto, decimal b.s.; X_e – 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 prever 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

Na Figura 1, observa-se as curvas da razão de umidade (RX) da polpa de tomate durante a secagem em camada de espuma nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C. Verifica-se que o aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo necessário para que o material atingisse o equilíbrio higroscópico, indicando maior velocidade de remoção de água. Esse comportamento está relacionado ao aumento do gradiente de temperatura entre o ar de secagem e a amostra, o que intensifica os processos de transferência de calor e massa e favorece a evaporação da água. Adicionalmente, temperaturas mais elevadas diminuem a resistência interna à difusão da umidade, acelerando a migração da água para a superfície do material e, consequentemente, reduzindo o tempo total de secagem.

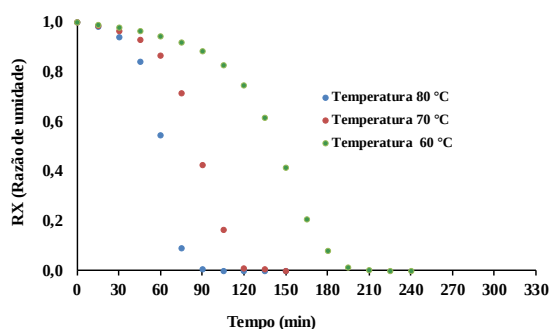


Figura 1. Cinética de secagem da polpa de tomate em função da temperatura.

Observa-se, a partir da Figura 1, que o tempo necessário para a secagem da polpa de tomate variou em função da temperatura aplicada, sendo aproximadamente de 105, 150 e 225 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.

Resultados semelhantes foram reportados por Baptestini et al. (2015) ao avaliarem a secagem em camada de espuma da polpa de tomate. Os autores observaram que o aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo de secagem, passando de 1035 minutos a 40 °C para apenas 225 minutos a 80 °C. Esse comportamento evidencia que temperaturas mais elevadas favorecem a transferência de calor e

massa, promovendo maior taxa de remoção de água e, consequentemente, acelerando o processo de secagem.

A modelagem matemática foi empregada para descrever a cinética do processo de secagem e identificar o modelo que melhor representou os dados experimentais nas diferentes temperaturas avaliadas. Para isso, os dados da razão de umidade (RX) obtidos durante a secagem da polpa de tomate foram ajustados aos modelos matemáticos de Henderson e Pabis, Page e Midilli e Kucuk, possibilitando avaliar a capacidade de cada modelo em representar o comportamento da secagem. Os ajustes dos modelos cinéticos de secagem em função da temperatura estão apresentados na Figura 2.

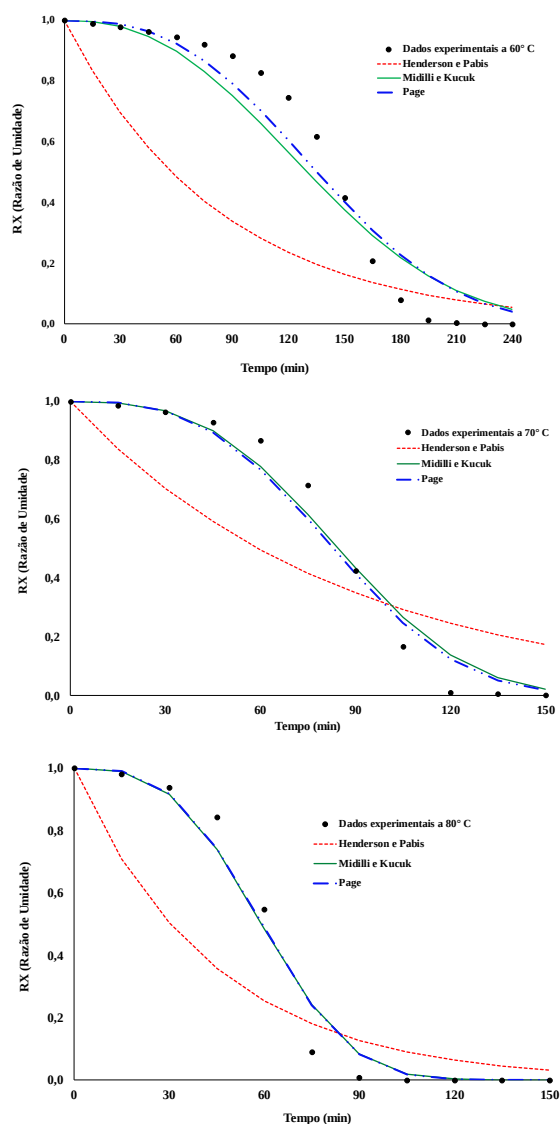


Figura 2. Ajuste dos modelos matemáticos nas temperaturas de 60, 70 e 80°C.

A modelagem matemática da secagem de produtos agrícolas tem sido amplamente empregada para descrever e prever os fenômenos de transferência de calor e de massa que ocorrem durante o processo.



Neste estudo, os modelos de Page e de Midilli e Kucuk apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais, conforme evidenciado pelos elevados coeficientes de determinação e pelos reduzidos valores de erro médio, demonstrando sua eficiência na representação da cinética de secagem.

Para o modelo de Page, os coeficientes de determinação, apresentaram valores variando de 0,991143; 0,990906 e 0,983864, e erros médios entre 0,437284; 0,526967 e 1,180169, para as temperaturas de 80, 70 e 60°C, demonstrando boa concordância entre os valores experimentais e os valores estimados pelo modelo.

Enquanto o modelo de Midilli e Kucuk, os valores de R^2 variaram entre 0,990884; 0,991342 e 0,976786, enquanto os erros médios oscilaram entre 0,448266; 0,543835 e 1,416647, para as temperaturas de 80, 70 e 60 °C, respectivamente, indicando elevada capacidade desse modelo em descrever a cinética de secagem da polpa de tomate

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.

Por outro lado, o modelo de Henderson e Pabis não apresentou desempenho estatístico satisfatório no ajuste aos dados experimentais da secagem da polpa de tomate em camada de espuma, mostrando-se inadequado para descrever a cinética do processo nas condições experimentais avaliadas. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram iguais ou inferiores a 0,889690 em todas as temperaturas investigadas, enquanto os valores do erro médio oscilaram entre 1,928897 e 4,449670. Esses resultados evidenciam a baixa capacidade preditiva do modelo, indicando que sua estrutura matemática não representa adequadamente o comportamento da cinética de secagem da polpa de tomate nas diferentes temperaturas estudadas.

CONCLUSÃO

A cinética de secagem da polpa de tomate em camada de espuma foi significativamente influenciada pela temperatura do ar de secagem. O aumento da temperatura reduziu o tempo necessário para a remoção da umidade, sendo observados tempos aproximados de 225, 150 e 105 minutos para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Esse comportamento está relacionado ao aumento da taxa de transferência de calor e de massa, que intensifica a evaporação da água e acelera o processo de secagem.

A modelagem matemática mostrou-se uma ferramenta eficiente para descrever o comportamento cinético da secagem da polpa de tomate. Os modelos de Page e de Midilli e Kucuk apresentaram os melhores desempenhos, evidenciados pelos elevados coeficientes de determinação e baixos valores de erro médio, demonstrando elevada capacidade de representar os dados experimentais. Dentre os modelos avaliados, o modelo de Page destacou-se por aliar elevada precisão à simplicidade de sua estrutura matemática, tornando-se a alternativa mais adequada para a descrição da cinética de secagem da polpa de tomate em camada de espuma nas condições estudadas. Em contraste, o modelo de Henderson e Pabis apresentou desempenho inferior, não representando satisfatoriamente a cinética de secagem do material.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Baptistini, 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>
- Bissacotti, A. P.; Londero, P. M. G.; Costabeber, I. C. Caracterização do tomate e seus compostos bioativos com propriedades funcionais. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 15, n. 2, p. 3680–3695, 2021.
- Buzrul, S. Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. *Processes*, Basel, v. 10, n. 1, p. 118, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10010118>
- Calín-Sánchez, Á. et al. Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*, Basel, v. 9, n. 9, p. 1261, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9091261>
- Cornejo, F. E. P.; Nogueira, A. M. P.; Wilberg, V. C. Técnicas de secagem de alimentos. Brasília: Embrapa, 2003.
- Davis, A. R.; Fish, W. W.; Perkins-Veazie, P. Carotenoid content of fresh and processed tomatoes. *Journal of Food Science*, v. 68, n. 9, p. 2574–2580, 2003.
- El-Mesery, H. S.; El-Seesey, A. I.; Hu, Z.; Li, Y. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review.



Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 157, p. 112070, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>

Fernandes, R. V. B. et al. Foam-mat drying of tomato pulp: effect of foam properties and drying temperature. *Journal of Food Engineering*, v. 118, n. 4, p. 818–825, 2013.

Goneli, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 56–64, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100005>

Hossain, M. A.; Ahmed, M.; Ferdaus, M. M. Optimization of foam-mat drying conditions of fruit/vegetable pulp using response surface methodology: effects on foam stability and powder quality. *Heliyon*, v. 10, n. 3, e25012, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25012>

Lima, G. P. P. et al. Functional and nutraceutical compounds of tomatoes as affected by agronomic practices, postharvest management, and processing methods: a mini review. *Frontiers in Nutrition*, v. 9, e868492, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.868492>

Martins, E. A. S. et al. Cinética de secagem de folhas de timbó. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 238–244, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p238-244>

Moritz, B.; Tramonte, V. L. C. Biodisponibilidade do licopeno e seus efeitos à saúde. *Revista de Nutrição*, v. 36, e220045, 2023.

Santos, A. A. L. et al. Emerging Drying Technologies and Their Impact on Bioactive Compounds: A Systematic and Bibliometric Review. *Applied Sciences*, Basel, v. 15, n. 12, p. 6653, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15126653>

Siqueira, V. C. et al. Secagem e modelagem matemática de produtos agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 3, p. 123–131, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000300005>

Wang, H. et al. Hot air drying of foods: Principles, applications, advances and challenges. *Drying Technology*, v. 41, n. 15, p. 1–27, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2127090>