SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DE PITAIA: COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS CONVECTIVO E MICRO-ONDAS INTERMITENTE

Matheus de Souza Cruz[1], Amanda Aparecida de Lima Santos[1], Jhenifer Cristina Carvalho Santos[1], Guilherme Mathias Lopes[1], Irineu Petri Júnior[1], Jefferson Luiz Gomes Corrêa[1]

[1]Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil (matheusnetsouza15@gmail.com)

Resumo: A pitaia é altamente perecível, tornando necessária sua transformação em produtos estáveis. Este estudo comparou a secagem convectiva e por micro-ondas intermitente na produção de pitaia em pó por camada de espuma. A secagem por micro-ondas, especialmente a 60 °C, reduziu o tempo de processo, aumentou a taxa de remoção de umidade e a difusividade efetiva, além de diminuir o consumo específico de energia. Assim, essa tecnologia mostrou-se promissora para a secagem de espumas de frutas.

Palavras-chave: Cinética de secagem; Consumo energético; *Whey protein*.

INTRODUÇÃO

A secagem em camada de espuma permite transformar matrizes líquidas ou pastosas em espumas estáveis, aumentando a área superficial exposta e favorecendo a transferência de massa (Macedo et al., 2021; Kumar et al., 2023). Essa modificação estrutural a torna adequada para a secagem de polpa de frutas pois reduz a resistência à difusão da água, possibilita menores tempos de secagem e contribui para a obtenção de pós porosos, solúveis e com maior retenção das características da matriz original (Çalışkan et al., 2022; Khatri et al., 2024).

O desempenho da secagem em camada de espuma depende diretamente do método utilizado para fornecer calor à matriz alimentícia. Na secagem convectiva, o calor é transferido predominantemente do ar aquecido para a superfície da espuma e, em seguida, conduzido para o interior, enquanto a umidade migra em sentido oposto até ser evaporada. Esse mecanismo é dependente, dentre outros fatores, da difusividade da umidade e da condutividade térmica da matriz espumada (Cruz et al., 2025; Kumar et al., 2023).

A secagem por micro-ondas promove aquecimento volumétrico, decorrente da rotação de dipolos moleculares e da migração iônica da água, favorecendo a geração interna de vapor e a intensificação da evaporação. Isto faz com que esta tecnologia apresente tempo de secagem e consumo energético reduzidos com relação ao processo convectivo (Dehghannya & Habibi-Ghods, 2025; Joardder & Karim, 2025).

Apesar do potencial das micro-ondas, sua aplicação contínua pode causar superaquecimento localizado, distribuição térmica não uniforme e degradação de compostos termossensíveis (Silveira et al., 2024). O uso de micro-ondas em regime intermitente pode contornar estas questões, permitindo a redistribuição de calor e umidade no interior da espuma, minimizando danos térmicos e melhorando a eficiência do processo (Macedo et al., 2022).

A aplicação destas tecnologias é particularmente relevante para frutas altamente perecíveis, como a pitaia (*Hylocereus spp*.), conhecida como fruta-do-dragão. Esse fruto destaca-se por seus atributos sensoriais e por sua composição rica em vitaminas, minerais, fibras, compostos fenólicos e betalaínas, pigmentos hidrossolúveis associados à coloração intensa e à atividade antioxidante (Ferreira et al., 2023; Shah et al., 2023). No entanto, sua elevada atividade de água e seu teor de açúcares favorecem a deterioração e a senescência, tornando necessário o uso de tecnologias capazes de prolongar sua vida útil e viabilizar sua transformação em produtos estáveis, como pós alimentícios, ingredientes naturais e formulações funcionais (Cruz et al., 2025; Kumar et al., 2023).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo investigar a aplicação da secagem em camada de espuma na produção de pitaia em pó, comparando os efeitos da secagem convectiva e da secagem por micro-ondas intermitente, em diferentes temperaturas, sobre a cinética de secagem e o consumo energético.

MATERIAL E MÉTODOS

As pitaias vermelhas (*Hylocereus polyrhizus*) foram adquiridas de produtor local da região de Lavras, MG, Brasil, e selecionadas quanto ao estádio de maturação, teor de sólidos solúveis e ausência de danos físicos. Os frutos foram lavados, sanitizados em solução de hipoclorito de sódio (200 mg/L por 15 min), despolpados e armazenados a –18 °C até o processamento. O descongelamento foi realizado mantendo-se as amostras por 12 h a 4 °C e, posteriormente, por 1 h a 25 °C em câmara de temperatura controlada (Eletrolab EL111/4, São Paulo, Brasil). Em seguida, as amostras foram homogeneizadas em agitador mecânico, e o extrato obtido foi utilizado imediatamente nas etapas subsequentes.

Para o preparo da espuma, foram adicionados ao extrato de pitaia (100 g) 5% (p/p) de *whey protein* (NewNutrion, Ribeirão Preto, SP, Brasil), como agente espumante, e 1% (p/p) de goma xantana (Êxodo Científica, Sumaré, SP, Brasil), como estabilizante. A mistura foi inicialmente homogeneizada em liquidificador (Britânia, Joinville, SC, Brasil), na velocidade máxima (nível 4), por 1 min. Posteriormente, foi batida em batedeira (Mondial, Conceição do Jacuípe, BA, Brasil) por 5 min, com aumento gradual da velocidade nos primeiros 30 s até atingir o nível máximo. A espuma obtida apresentou umidade inicial de 81,28 ± 0,67%.

A secagem foi conduzida utilizando 60,50 ± 0,26 g de espuma, distribuída em recipiente circular de 26 cm de diâmetro, formando camada de 0,5 cm de espessura. Os tratamentos avaliados foram definidos em função do método de secagem e da temperatura de processo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Condições experimentais.

Tratamentos	Secador	Temperatura (ºC)
C40	Convectivo	40
C60	Convectivo	60
M40	Micro-ondas	40
M60	Micro-ondas	60

A cinética de secagem foi monitorada por pesagens periódicas, realizadas a cada 5 min durante a primeira hora e, posteriormente, a cada 10 min, em balança analítica (Marte Científica, modelo AD33000, Brasil), com exatidão de ±0,01 g. Durante o processo, o porta-amostras foi girado 90° a cada pesagem, a fim de minimizar o efeito da posição da bandeja no secador. A secagem foi conduzida até que as amostras atingissem umidade final de aproximadamente 8,00% em base úmida, garantindo atividade de água inferior a 0,6 (Macedo et al., 2022).

A secagem convectiva foi realizada em sistema experimental desenvolvido pelo grupo de pesquisa (Figura 1), composto por câmara de secagem (53 × 32,5 × 45 cm), ventilador radial (200 m³/h), duto de aço galvanizado (56 × 34 × 24 cm; espessura de 1 mm) isolado com lã de vidro (5 cm) e resistências elétricas posicionadas perpendicularmente ao fluxo de ar. A entrada de ar aquecido ocorreu por abertura de 10 × 8 cm localizada na parede posterior da câmara, enquanto a exaustão foi realizada por orifício lateral de 10 × 8 cm (Junqueira, Corrêa e Ernesto, 2017). A temperatura foi monitorada continuamente por termopar e controlada por sistema liga/desliga, mantendo-se próxima ao ponto de ajuste durante todo o processo. Os parâmetros operacionais foram controlados por software LabView acoplado a Arduino (Silveira et al., 2024).



Figura 1. Representação ilustrativa do secador convectivo.

A secagem por micro-ondas foi realizada em forno micro-ondas doméstico adaptado (Brastemp BMG45, 32 L, 900 W), acoplado a um controlador digital para ajuste manual da temperatura de referência (Figura 2). A temperatura foi monitorada continuamente por termopar inserido nas amostras. O processo foi conduzido em regime intermitente, com controle automático do tipo on–off, no qual o magnetron permanecia acionado até atingir o setpoint, desligando-se automaticamente e religando quando a temperatura da amostra diminuía abaixo do valor estabelecido. O tempo de operação foi controlado pelo painel convencional do forno, com leituras periódicas de massa, e a potência foi mantida constante em 100% durante toda a secagem.



Figura 2. Representação ilustrativa do secador micro-ondas.

A razão de umidade (RU) foi determinada pela relação entre o teor de umidade em determinado tempo (X_t), a umidade inicial (X_0) e a umidade de equilíbrio (X_e), conforme a Equação 1.

$$RU = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

A taxa de secagem (DR) foi calculada a partir da variação do teor de umidade entre intervalos consecutivos de tempo, conforme a Equação 2 (Cruz et al., 2025).

$$DR = \frac{X_t + X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2)$$

A difusividade efetiva de umidade foi estimada com base no modelo de Crank (1975), derivado da segunda lei de Fick. O modelo considera distribuição inicial uniforme de umidade, difusividade e temperatura constantes, retração e resistência externa desprezíveis, além de geometria de placa. Como as espumas foram distribuídas em camada fina, o modelo foi aplicado para representar a transferência de umidade do centro para a superfície da amostra durante a secagem.

$$\mathrm{RU} = \left[\frac{8}{\pi^2}\sum_{i=0}^{\infty}\frac{1}{(2i+1)^2}\, exp\left(-(2i+1)^2\pi^2\, D_{eff}\,\frac{t}{4L^2}\right)\right] \quad (3)$$

onde RU é a razão de umidade adimensional, D_{eff} representa a difusividade efetiva (m^2/s), t é o tempo (s), i é o número de termos na série e L é o comprimento característico (metade da espessura da amostra) (m).

Os parâmetros foram estimados por regressão não linear (Santos et al., 2025). A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), conforme as Equações 4, 5 e 6.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2}\right] \quad (4)$$

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2}{N - n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right]^2}{N}} \quad (6)$$

onde MR*exp* e MR*pre* são a proporção de água adimensional ou os conteúdos sólidos experimentais e previstos, respectivamente; N é o número de observações; e n é o número de constantes.

O consumo energético dos processos de secagem foi mensurado com medidor de energia digital (Moko Smart, modelo MK114B, China). A partir dos valores registrados, foram calculados a taxa específica de extração de umidade (SMER) e o consumo específico de energia (SEC), conforme as Equações 7 e 8 (Tepe, 2025).

$$SMER = \frac{Umidade\ total\ removida\ (kg)}{Energia\ consumida\ (kWh)} \quad (7)$$

$$SEC = \frac{Energia\ total\ consumida\ (kWh)}{Umidade\ total\ removida\ (kg)} \quad (8)$$

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica, versão 14.0.1.8 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados demonstraram que o método de secagem e a temperatura influenciaram diretamente a cinética de remoção de umidade da espuma de pitaia. Pela Figura 3, observa-se redução contínua da razão de umidade ao longo do tempo em todos os tratamentos, sem uma fase de taxa constante claramente definida. Esse comportamento indica predominância do período de taxa decrescente, no qual a remoção de água passa a ser controlada principalmente pela difusão interna da umidade. Em sistemas espumosos, após a evaporação da água mais superficial, a migração da umidade retida nas lamelas líquidas, nos bordos de Plateau e na estrutura porosa torna-se o fator limitante do processo, reduzindo gradualmente a velocidade de secagem (Dehghannya et al., 2018; Macedo et al., 2021).

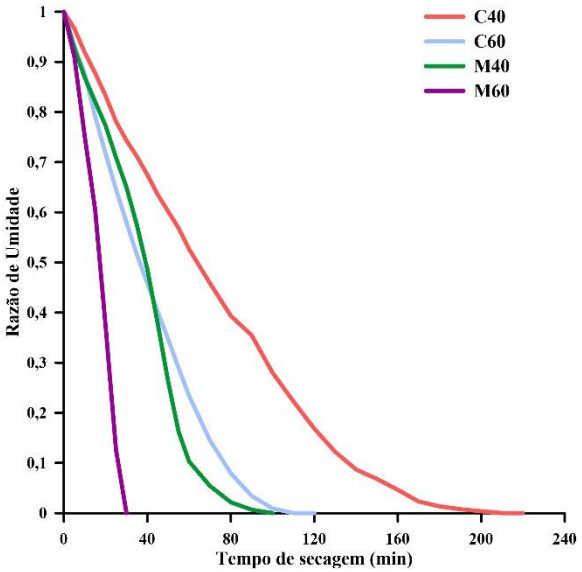


Figura 3. Cinética de secagem. C = secador convectivo; MW = secador micro-ondas; 40 e 60 são as temperaturas de secagem.

A secagem convectiva apresentou queda mais gradual da razão de umidade, evidenciando menor velocidade de remoção de água. Esse comportamento está associado ao mecanismo de transferência de calor por convecção, no qual o ar aquecido transfere energia inicialmente para a superfície da amostra, enquanto a umidade migra do interior para a superfície, onde é evaporada. Como a matriz espumada apresenta baixa condutividade térmica, o aquecimento das regiões internas ocorre de forma mais lenta, favorecendo maiores tempos de processo. Além disso, a formação de uma camada superficial mais seca pode aumentar a resistência à migração da umidade interna, dificultando a transferência de massa ao longo da secagem (Kumar et al., 2019).

Em contraste, os tratamentos por micro-ondas apresentaram redução mais acentuada da razão de umidade, especialmente na maior temperatura. Esse comportamento decorre do aquecimento volumétrico, no qual a radiação eletromagnética interage diretamente com moléculas polares, principalmente a água, promovendo reorientação dipolar e geração interna de calor. Em espumas, esse aquecimento tende a ocorrer preferencialmente nas regiões com maior acúmulo de água, como lamelas líquidas e bordos de Plateau, favorecendo a geração de vapor, o aumento da pressão interna e o transporte mais rápido de umidade em direção à superfície (Huang et al., 2021; De Mendonça et al., 2023). Assim, enquanto a convecção depende da transferência gradual de calor da superfície para o interior, as micro-ondas intensificam a remoção de água a partir da própria matriz.

As curvas de taxa de secagem apresentadas na Figura 4 reforçam essa diferença entre os mecanismos. Os tratamentos por micro-ondas apresentaram maiores taxas de secagem, principalmente nos estágios iniciais e intermediários, quando o teor de umidade da espuma ainda é elevado. Nessa etapa, a maior disponibilidade de água favorece a absorção da energia eletromagnética e a rápida formação de vapor interno, intensificando a evaporação. Com o avanço da secagem, a redução do teor de água aumenta a resistência interna à transferência de massa, resultando na diminuição progressiva da taxa de secagem. Esse comportamento é coerente com a transição da matriz espumada de um estado mais viscoelástico e deformável para uma estrutura mais rígida, menos favorável ao deslocamento da umidade (Huang et al., 2021; Gaewsondee et al., 2025).

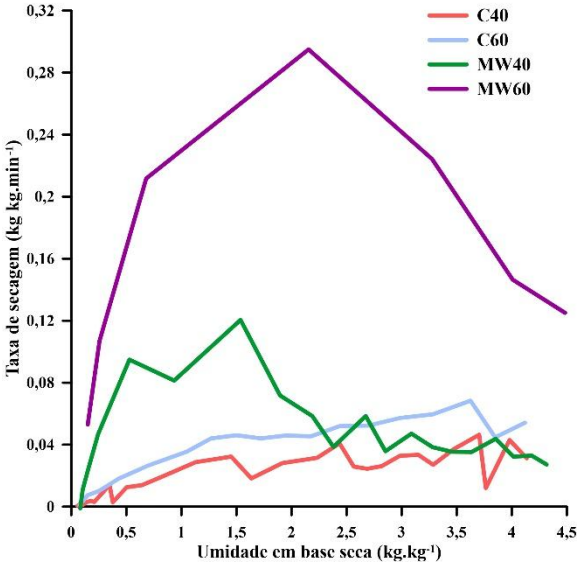


Figura 4. Taxa de secagem. C = secador convectivo; MW = secador micro-ondas; 40 e 60 são as temperaturas de secagem.

A Tabela 2 confirma que o tempo de secagem foi significativamente afetado pelo método de aquecimento e pela temperatura. Os tratamentos convectivos demandaram maior tempo para atingir a umidade final, enquanto os tratamentos por micro-ondas reduziram expressivamente a duração do processo. A semelhança estatística entre o tratamento convectivo em maior temperatura e o tratamento por micro-ondas em menor temperatura indica que o aquecimento por micro-ondas, mesmo sob condição térmica mais branda, foi capaz de alcançar desempenho semelhante ao da convecção em temperatura mais elevada. Esse resultado evidencia a maior eficiência cinética do aquecimento volumétrico para a secagem de espumas alimentícias.

Tabela 2. Tempo de secagem das espumas de pitaia obtidas por secador convectivo (C) e microondas (M) nas temperaturas de 40 e 60 ºC.

Tratamentos	Tempo (min)
C40	227 ± 21 a
C60	120 ± 10 b
M40	90 ± 5 b
M60	30 ± 5 c

A difusividade efetiva de umidade, apresentada na Tabela 3, acompanhou o comportamento observado nas curvas de secagem. O aumento da temperatura elevou a difusividade, indicando maior facilidade de transporte interno de água. Esse efeito pode ser atribuído ao aumento da mobilidade molecular da água, à intensificação dos gradientes térmicos e de pressão de vapor e à redução da resistência interna à transferência de massa (Macedo et al., 2021; Huang et al., 2021).

Tabela 3. Difusividade efetiva em secagem camada de espuma de pitaya em secador convectivo (C) e em microondas (M) em 40 e 60 ºC.

Tratamentos	D_{eff} x10^8 (m^2/s)
C40	$2.47x10^{-8} \pm 1.46x10^{-9}$ b
C60	$4.29x10^{-8} \pm 1.24x10^{-9}$ b
M40	$3.01x10^{-8} \pm 6.14x10^{-9}$ b
M60	$1.06x10^{-7} \pm 2.16x10^{-8}$ a

Entre os tratamentos, a secagem por micro-ondas em maior temperatura apresentou a maior difusividade, diferindo estatisticamente dos demais. Nesse caso, o valor de D_{eff} não representa apenas a difusão molecular da água, mas também efeitos adicionais associados à geração de pressão interna, expansão da estrutura, possível formação de microcanais e maior facilidade de escape do vapor (Wang et al., 2019; Izli, Yildiz e Berk, 2022; Gaewsondee et al., 2025).

Os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 4 indicam que o modelo descreveu satisfatoriamente o comportamento de secagem, principalmente nos tratamentos convectivos. Os maiores valores de R^2 e os menores valores de RMSE e χ^2 observados nesses tratamentos indicam maior proximidade entre os dados experimentais e os valores preditos. Esse melhor ajuste pode estar relacionado à cinética mais gradual e regular da secagem convectiva, na qual a transferência de calor e massa ocorre de maneira mais dependente da difusão interna.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos obtidos em ajuste da equação de Fick para as condições de secagem em camada de espuma em secador convectivo (C) e em microondas (M) em 40 e 60 ºC.

Tratamentos	R^2	RMSE	x^2
C40	0.94 ± 0.00 a	0.11 ± 0.00 b	0.01 ± 0.00 c
C60	0.94 ± 0.01 a	0.11 ± 0.01 b	0.01 ± 0.00 c
M40	0.85 ± 0.03 b	0.17 ± 0.02 a	0.03 ± 0.01 b
M60	0.87 ± 0.01 b	0.18 ± 0.01 a	0.05 ± 0.00 a

Embora a equação de Fick seja bastante usada e ajuste situações em que não haja somente o processo difusivo envolvido, observa-se que quanto menos distante de um processo puramente difusivo, menor o valor de r^2 do ajuste. Nas secagens convectivas (C40 e C60), r^2 já se afasta de 0,99. Nos tratamentos por micro-ondas (M40 e M60), o ajuste foi relativamente inferior, como indicado pelos menores valores de R^2 e maiores erros. Esse comportamento pode estar associado à maior complexidade do processo, envolvendo aquecimento volumétrico, intermitência do magnetron e possíveis gradientes térmicos e de umidade no interior da espuma. Essas características podem gerar oscilações na remoção de água e reduzir a precisão do modelo. Ainda assim, os parâmetros obtidos indicam que o modelo foi útil para estimar a difusividade efetiva, embora com maior adequação aos tratamentos convectivos.

A Tabela 5 demonstra que a secagem por micro-ondas apresentou melhor desempenho energético, com maior taxa específica de extração de umidade e menor consumo específico de energia em comparação ao método convectivo. Esse resultado está diretamente associado à forma de transferência de energia. Na secagem convectiva, parte significativa da energia é consumida no aquecimento do ar, das paredes da câmara, do sistema de circulação e do ambiente interno do secador antes de ser efetivamente transferida para a amostra. Além disso, o maior tempo de processo contribui para elevar o consumo total de energia (Kumar et al., 2019; Qadri, 2022).

Tabela 5. Consumo energético das condições de secagem em camada de espuma em secador convectivo (C) e em microondas (M) em 40 e 60 ºC

Tratamentos	SMER (kg/kWh)	SEC (kWh/kg)
C40	0.032 ± 0.003 b	31.438 ± 3.238 a
C60	0.032 ± 0.003 b	31.438 ± 3.238 a
M40	0.280 ± 0.022 a	3.581 ± 0.274 b
M60	0.280 ± 0.022 a	3.581 ± 0.274 b

Por outro lado, na secagem por micro-ondas, a energia eletromagnética é absorvida diretamente pela matriz, especialmente pela água, promovendo aquecimento interno e evaporação mais rápida. Esse direcionamento mais eficiente da energia, associado à redução do tempo de processo, resultou em maior eficiência na remoção de umidade. Esses resultados corroboram estudos que apontam a secagem por micro-ondas como uma alternativa promissora para reduzir o consumo energético em processos de secagem, especialmente quando conduzida sob condições controladas e intermitentes (Wang et al., 2019; Huang et al., 2021; Izli, Yildiz e Berk, 2022). Portanto, a secagem por micro-ondas em maior temperatura destacou-se como a condição mais eficiente para a produção de pitaia em pó por camada de espuma, ao combinar maior velocidade de secagem, maior difusividade efetiva e melhor desempenho energético.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a secagem em camada de espuma é uma alternativa viável para a produção de pitaia em pó, sendo o desempenho do processo influenciado pelo método de aquecimento e pela temperatura. A secagem por micro-ondas intermitente, especialmente a 60 °C, apresentou o melhor desempenho, proporcionando menor tempo de secagem, maiores taxas de remoção de umidade, maior difusividade efetiva e menor consumo específico de energia. Esses resultados evidenciam a eficiência do aquecimento volumétrico na intensificação das transferências de calor e massa durante a secagem.

Em contrapartida, a secagem convectiva apresentou comportamento cinético mais lento e maior demanda energética, embora tenha demonstrado melhor ajuste ao modelo matemático empregado. Dessa forma, a aplicação de micro-ondas intermitentes se apresenta como uma estratégia tecnológica adequada para se obter secagem com tempo de processamento reduzido com maior eficiência energética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio institucional e financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ÇALIŞKAN KOÇ, G.; TEKGÜL, Y.; YÜKSEL, A. N.; KHANASHYAM, A. C.; KOTHAKOTA, A.; PANDISELVAM, R. Recent development in foam-mat drying process: influence of foaming agents and foam properties on powder properties. *Journal of Surfactants and Detergents*, 25, 539–557, 2022.

CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, Oxford, 1975.

CRUZ, M. D. S.; CORRÊA, J. L. G.; MACEDO, L. L.; NASCIMENTO, B. D. S.; SANTOS, A. A. D. L.; MACHADO, G. G. L. et al. Use of ethanol in convective drying of coated and osmotically dehydrated papaya with isomaltulose. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 4048–4066, 2025.

DEHGHANNYA, J.; HABIBI-GHODS, M. Microwave drying of food materials: principles, hybrid techniques, modeling approaches, and emerging innovations. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70312, 2025.

DEHGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. *Journal of Food Engineering*, 238, 164–177, 2018.

FERREIRA, V. C.; AMPESE, L. C.; SGANZERLA, W. G.; COLPINI, L. M. S.; FORSTER-CARNEIRO, T. An updated review of recent applications and future perspectives on the sustainable valorization of pitaya (*Hylocereus* spp.) by-products. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101070, 2023.

GAEWSONDEE, P.; CHUPAWA, P.; SAIJUNTHA, J.; RONSSE, F.; PIETERS, J.; DUANGKHAMCHAN, W. Real-time image-based control of foam puffing dynamics in microwave-assisted foam-mat drying. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 10686–10711, 2025.

HUANG, D.; MEN, K.; TANG, X.; LI, W.; SHERIF, S. A. Microwave intermittent drying characteristics of *Camellia oleifera* seeds. *Journal of Food Process Engineering*, 44, e13608, 2021.

İZLI, G.; YILDIZ, G.; BERK, S. E. Quality retention in pumpkin powder dried by combined microwave-convective drying. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 1558–1569, 2022.

JOARDDER, M. U.; KARIM, M. A. Toward uniform microwave heating in food drying: principles, technologies, and emerging trends. *Food Engineering Reviews*, 17, 946–965, 2025.

JUNQUEIRA, J. R. D. J.; CORRÊA, J. L. G.; ERNESTO, D. B. Microwave, convective, and intermittent microwave–convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, e13250, 2017.

KHATRI, B.; HAMID; SHAMS, R.; DASH, K. K.; SHAIKH, A. M.; BÉLA, K. Sustainable drying

techniques for liquid foods and foam mat drying. *Discover Food*, 4, 166, 2024.

KUMAR, G.; KUMAR, N.; PRABHAKAR, P. K.; KISHORE, A. Foam mat drying: recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63, 8275–8291, 2023.

KUMAR, V.; DEVI, M. K.; PANDA, B. K.; SHRIVASTAVA, S. L. Shrinkage and rehydration characteristics of vacuum assisted microwave dried green bell pepper. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13030, 2019.

MACEDO, L. L.; CORRÊA, J. L. G.; ARAÚJO, C. D. S.; VIMERCATI, W. C.; PIO, L. A. S. Process optimization and ethanol use for obtaining white and red dragon fruit powder by foam mat drying. *Journal of Food Science*, 86, 426–433, 2021.

MACEDO, L. L.; CORRÊA, J. L. G.; JÚNIOR, I. P.; SILVA ARAÚJO, C.; VIMERCATI, W. C. Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. *LWT*, 155, 112918, 2022.

MENDONÇA, J. D. S.; GUIMARÃES, R. D. C. A.; ZORGETTO-PINHEIRO, V. A.; FERNANDES, C. D. P.; MARCELINO, G.; BOGO, D.; FREITAS, K. C.; HIANE, P. A.; MELO, E. S. P.; NASCIMENTO, V. A. D. Natural antioxidant evaluation: a review of detection methods. *Molecules*, 27, 3563, 2022.

QADRI, O. S. Microwave drying of foamed tomato pulp: optimization and mass transfer modelling. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e15954, 2022.

SANTOS, A. A. D. L.; CORRÊA, J. L. G.; CRUZ, M. D. S.; SILVEIRA, P. G.; LOPES, G. M.; JUNQUEIRA, J. R. D. J. et al. Isomaltulose as a healthier carbohydrate alternative in pulsed vacuum osmotic dehydration of banana. *Food and Bioprocess Technology*, 1–19, 2025.

SHAH, K.; CHEN, J.; CHEN, J.; QIN, Y. Pitaya nutrition, biology, and biotechnology: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 13986, 2023.

SILVEIRA, P. G.; CORRÊA, J. L. G.; SILVA, C. R. D. P.; MACEDO, L. L.; GONÇALVES, W. S.; JÚNIOR, I. P. Innovative strategies in yacon drying: ethanol pretreatment and intermittent microwave drying. *Journal of Food Science*, 89, 4941–4952, 2024.

TEPE, F. B. Novel approaches for potato drying: intermittent microwave drying with pretreatments (ethanol, hot water blanching, and citric acid), drying and quality properties, and energy consumption. *Potato Research*, 68, 2579–2608, 2025.

WANG, Q.; LI, S.; HAN, X.; NI, Y.; ZHAO, D.; HAO, J. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave–assisted drying methods. *LWT – Food Science and Technology*, 107, 236–242, 2019.