

## ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA POLPA DE SERIGUELA

Jhessica Eliziane Santos Lichtnow<sup>1</sup>, Claudinéia Aparecida Queli Geraldi<sup>2</sup>, Sumaya Ferreira Guedes<sup>3</sup>, Raquel Aparecida Loss<sup>4</sup>, Tulio Klassen<sup>5</sup>, Ana Thayna Dutra<sup>6</sup>

### RESUMO:

O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores mundiais de frutas, ocupando a terceira posição no ranking global, com produção anual estimada em aproximadamente 45 milhões de toneladas em 2025. A seriguela (*Spondias purpurea* L.), fruta tropical rica em nutrientes, possui alta perecibilidade. Para minimizar as perdas na colheita, a secagem em camada de espuma surge como alternativa de avaliar a cinética de secagem da polpa de seriguela utilizando os modelos matemáticos de Henderson e Pabis, Midilli e Kucuk e Page, além de possibilitar a análise das propriedades físico-químicas das polpas *in natura* e seca. A secagem foi realizada em estufa com circulação e renovação forçada de ar, nas temperaturas de 60, 70 e 80°C. O tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura, sendo 250, 180 e 120 minutos, respectivamente. O modelo de Page apresentou os melhores ajustes ( $R^2 > 0,998$ ), seguido por Midilli e Kucuk. Já o modelo de Henderson e Pabis não se ajustou adequadamente. O pH da polpa *in natura* e secas nas três temperaturas estudadas apresentaram uma pequena variação entre elas e a umidade final foi 15,66, 12,92 e 12,25% nas temperaturas de 60, 70 e 80°C, respectivamente. Os resultados obtidos demonstraram desempenho satisfatório, uma vez que foi possível identificar um modelo matemático capaz de descrever adequadamente o comportamento da secagem da polpa de seriguela. Conclui-se que o processo de secagem em camada de espuma apresenta eficiência na conservação da polpa, destacando-se o modelo de Page como o mais adequado para representar sua cinética de secagem.

**Palavras-chave:** Curva de secagem, modelos matemáticos, análise físico-química.

### STUDY OF THE KINETICS OF FOAM LAYER DRYING OF SERIGUELA PULP

### ABSTRACT:

Brazil is a leading global fruit producer, with an estimated annual output of approximately 45 million tons in 2025. However, tropical fruits like seriguela (*Spondias purpurea* L.) are highly perishable, leading to significant post-harvest losses. This study aimed to evaluate the drying kinetics of seriguela pulp using the foam-mat drying method and to assess the physicochemical properties of the fresh and dried pulp. The experimental data were fitted to three mathematical models: Henderson and Pabis, Midilli and Kucuk, and Page. Drying was performed in a forced-air convection oven at 60, 70, and 80 °C. Drying times decreased as temperature increased, requiring 250, 180, and 120 minutes, respectively. The Page model provided the best fit to the experimental data ( $R > 0.998$ ), followed by the Midilli and Kucuk model, whereas the Henderson and Pabis model did not adequately fit the data. Physicochemical analysis revealed that the pH of the pulp remained stable across all tested temperatures. Final moisture contents were 15.66%, 12.92%, and 12.25% for

<sup>1</sup>Bacharel em Agronomia. Universidade do Estado de Mato Grosso Campus Universitário de Nova Mutum. Nova Mutum-MT. [jhessica.lichtnow@unemat.br](mailto:jhessica.lichtnow@unemat.br), <https://orcid.org/0009-0003-0363-2409>. <sup>2</sup>Doutora em Engenharia Química. Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Nova Mutum. Nova Mutum-MT; [claudineia.geraldi@unemat.br](mailto:claudineia.geraldi@unemat.br), <https://orcid.org/0000-0001-5255-9752>. <sup>3</sup>Doutora em Ciências. Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Nova Mutum. Nova Mutum-MT, [sumayaguedes@unemat.br](mailto:sumayaguedes@unemat.br), <https://orcid.org/0000-0002-1613-3647>. <sup>4</sup>Doutora em Engenharia de Alimentos. Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário Eugênio Carlos Stieler, Tangará da Serra-MT, [raquellloss@unemat.br](mailto:raquellloss@unemat.br), <https://orcid.org/0000-0002-6022-7552>. <sup>5</sup>Mestre em Engenharia Química. Escola Cenecista Hilda Strenger Ribeiro, Nova Mutum-MT, [tulio\\_klassen@onda.com.br](mailto:tulio_klassen@onda.com.br), <https://orcid.org/0000-0001-7468-4378>. <sup>6</sup>Estudante de graduação em Agronomia. Universidade do Estado de Mato Grosso Campus Universitário de Nova Mutum. Nova Mutum-MT, [ana.thayna.dutra@unemat.br](mailto:ana.thayna.dutra@unemat.br), <https://orcid.org/0009-0006-4663-0894>.

treatments at 60, 70, and 80 °C, respectively. In conclusion, foam-mat drying is an efficient process for preserving seriguela pulp, and the Page model is highly suitable for predicting its drying kinetics.

**Keywords:** Drying curve, mathematical models, physicochemical analysis.

## INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), houve uma produção global de mais de 950 milhões de toneladas de frutas no mundo (FAO, 2024). O Brasil destacou-se como o terceiro maior produtor mundial, alcançando em 2023 o número de 43 milhões de toneladas, tendo uma variação de produção anual de 3,38% comparado com 2022 (ABRAFRUTAS, 2025).

A maior parte das frutas produzidas no Brasil é consumida no mercado interno. Nas exportações, o Brasil obteve um valor líquido de 1,07 milhões de toneladas em 2024, quase 1% a menos, quando comparado com o ano de 2023 (ABRAFRUTAS, 2025).

Segundo estimativas mais recentes da FAO e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) o desperdício de alimentos permanece elevado no país, alcançando valores entre 27 e 30 milhões de toneladas por ano, considerando perdas ao longo da cadeia produtiva e descarte no varejo e nos domicílios (PNUMA, 2024; FAO, 2023). Diferentemente do que se apontava anteriormente quanto à ausência de dados, relatórios internacionais mais recentes passaram a incluir o Brasil entre os países com maior volume absoluto de desperdício alimentar.

Os relatórios mencionados correspondem a documentos internacionais amplamente utilizados como referência para estimativas de perdas e desperdício de alimentos:

**PNUMA (2024):** *Food Waste Index Report 2024*, elaborado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, que apresenta dados atualizados sobre o desperdício de alimentos em nível global, incluindo estimativas para países como o Brasil, com base em consumo domiciliar, varejo e serviços alimentares.

**FAO (2023):** Relatórios da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura relacionados a perdas e desperdício de alimentos, como o *The State of Food and Agriculture (SOFA)* e atualizações sobre *Food Loss and Waste*, que abordam perdas ao longo da cadeia produtiva (produção, pós-colheita, processamento e distribuição).

Esses documentos são as principais bases internacionais para análise do desperdício alimentar e

têm sido utilizados em estudos recentes para estimar o volume de perdas no Brasil e no mundo.

A perda de alimentos pode ser compreendida como a redução quantitativa ou qualitativa de alimentos destinados ao consumo humano, ocorrendo principalmente nas etapas de produção, pós-colheita, armazenamento e transporte, antes de chegarem ao consumidor final. Já o desperdício refere-se ao descarte de alimentos próprios para consumo nas fases de varejo e consumo doméstico (FAO, 2023).

Em escala global, o relatório *Food Waste Index Report 2024*, indica que, em 2022, foram desperdiçadas aproximadamente 1,05 bilhão de toneladas de alimentos, o que corresponde a cerca de 19% dos alimentos disponíveis ao consumidor, superando as estimativas anteriores de 931 milhões de toneladas referentes a 2019 (PNUMA, 2024).

A secagem constitui uma das principais técnicas de conservação de alimentos, especialmente de frutas, por promover a redução do teor de água e, conseqüentemente, da atividade de água ( $A_w$ ), fator determinante para o controle do crescimento microbiano e da atividade enzimática. A diminuição desses parâmetros retarda reações bioquímicas e processos deteriorativos, prolongando a vida útil do produto. Além disso, quando conduzida sob condições adequadas de temperatura e tempo, a secagem pode favorecer a concentração de nutrientes e compostos bioativos, contribuindo para a manutenção de compostos aromáticos e antioxidantes como compostos fenólicos (flavonoides e ácidos fenólicos), ácido ascórbico (vitamina C) e carotenoides (Zhao et al., 2025).

Do ponto de vista tecnológico e logístico, a secagem também promove a redução significativa da massa e do volume do alimento, facilitando o armazenamento, o transporte e a comercialização. A menor necessidade de refrigeração resulta em economia energética e redução de custos operacionais (Silva Filho et al., 2016; FOOD SAFETY INSTITUTE, s.d.; Zhao et al., 2025). Dessa forma, a remoção parcial ou quase total da água não apenas assegura maior estabilidade microbiológica e físico-química, mas também amplia a disponibilidade do produto ao longo do ano, atendendo às exigências do mercado e contribuindo para estratégias de segurança alimentar.

A seriguela (*Spondias purpurea* L.) é uma espécie frutífera pertencente à família Anacardiaceae,

originária das regiões tropicais da América e amplamente adaptada a condições climáticas quentes.

Seus frutos são classificados botanicamente como drupas, apresentando formato ovoide e coloração que varia do amarelo ao vermelho intenso, conforme o estágio de maturação. A casca é fina e lisa, envolvendo polpa macia, suculenta e de coloração amarelada, caracterizada por aroma marcante e sabor predominantemente adocicado. O endocarpo lenhoso (caroço), de tonalidade clara, apresenta tamanho relativamente grande em relação ao volume do fruto, característica típica da espécie (Silva et al., 2025).

Do ponto de vista nutricional, a seriguela apresenta composição relevante, destacando-se pelo conteúdo de carboidratos, minerais como cálcio, ferro e fósforo, além de vitamina A, do complexo B e vitamina C, e que contribuem para seu potencial antioxidante e funcional (Silva et al., 2025; SOUSA et al., 2023). Entretanto, é um fruto altamente perecível, apresentando rápida evolução para o amadurecimento excessivo e senescência após a colheita, o que compromete suas características sensoriais e reduz o tempo de comercialização. Fatores como manejo inadequado na colheita, deficiência nas etapas de pós-colheita, armazenamento e transporte, aliados à sazonalidade da produção, contribuem significativamente para perdas quantitativas e qualitativas ao longo da cadeia produtiva (Sousa et al., 2023).

Desta forma, o processo de desidratação de frutas é um segmento promissor e com alto potencial de crescimento, no entanto pouco explorado comercialmente no Brasil (Freitas et al., 2018). Entre os processos de secagem destaca-se o método de camada de espuma, que é utilizado em alimentos sensíveis ao calor, viscosos e com altos níveis de açúcar, como frutas e sucos de frutas (Freitas et al., 2018).

Esse método sobressai frente ao tradicional pela fácil reconstituição em água da polpa transformada em pó, alta relação massa/volume, possibilidade de formulação com outros produtos e redução de custos com espaço de armazenamento (Araújo et al., 2017; Silva et al., 2018). Por ocorrer a temperaturas mais baixas de desidratação, e por menor tempo, uma vez que a área superficial é maior em comparação com a secagem com leito convencional, apresenta como vantagem uma maior preservação das características nutricionais e

sensoriais do produto (Kumar et al., 2022; Santos et al., 2024).

A modelagem da cinética de secagem de frutas é fundamental para descrever e prever o comportamento da remoção de umidade ao longo do tempo (Erbay e İcier, 2021). Modelos matemáticos empíricos e semiempíricos, são amplamente utilizados para ajustar dados experimentais e estimar parâmetros do processo, apresentando bons coeficientes de determinação em estudos com alimentos (Midilli e Kucuk, 2022).

Diante do exposto, os objetivos do trabalho foram obter as curvas de secagem da polpa de seriguela em camadas de espuma, realizar a modelagem matemática verificando qual modelo cinético melhor se ajustaria e analisar as propriedades físico-química das polpas *in natura* e seca.

## MATERIAL E MÉTODOS

As análises físico-químicas foram realizadas no laboratório de Química da Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus Universitário de Nova Mutum MT- Brasil.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada como matéria-prima a polpa *in natura* da seriguela (*Spondias purpurea* L.). As frutas foram coletadas em uma propriedade privada no município de Diamantino-Mato Grosso, e o aditivo emulsificante O Emustab® é um produto da marca Selecta, (composto por monoglicerídeos de ácidos graxos, monoestearato de sorbitana, polioxietileno de monoestearato de sorbitana e sorbato de potássio), adquirido no comércio local.

As frutas foram lavadas em água corrente e higienizadas. Em seguida, foram despulpadas manualmente com auxílio de uma faca e congeladas em camadas (utilizou-se folhas plásticas utilizada para separar alimentos para realizar a separação das camadas em freezer a -18 °C. As polpas congeladas foram retiradas do freezer com uma hora de antecedência para facilitar sua homogeneização em liquidificador (marca Britânia Diamante 800).

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica em relação a quantidade de emulsificante a ser utilizado, e verificado que o percentual em massa de 4% fornecia uma espuma estável, o qual foi adicionado à polpa homogeneizada. A mistura foi batida em batedeira doméstica (Philips Walita®) por um tempo pré-determinado de sete minutos em velocidade

máxima, obtendo assim uma espuma estável similar ao ponto de clara em neve. As curvas de secagem foram obtidas através da distribuição da espuma em placas de Petri (10 g em cada placa), e submetidas a estufa marca Cienlab 1501, com circulação e renovação forçada de ar. As temperaturas utilizadas no processo de secagem foram de 60, 70 e 80 °C. A cada 15 minutos mediu-se a massa das espumas e, a secagem foi conduzida até atingir o equilíbrio (massa constante).

Após a secagem, o produto foi transferido das placas de Petri com auxílio de uma espátula para embalagens de polietileno e armazenadas sob refrigeração (8 °C).

Após obter a umidade de equilíbrio, a razão de umidade (RU) foi calculada através da equação (01):

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

Onde: RU - Razão de umidade, adimensional; X – Teor de água do produto em base seca;  $X_i$  – Teor de água inicial em base seca;  $X_e$  – Teor de água de equilíbrio em base seca.

Foram utilizados os modelos semiempíricos de Henderson e Pabis (1961), Page (1949) e Midilli e Kucuk (2002). Conforme apresentados na Tabela 1, as curvas de secagem e o ajuste dos modelos matemáticos foram obtidos com o auxílio do Excel (Microsoft Excel 365®).

**Tabela 1.** Modelos matemáticos utilizados para descrever a cinética de secagem da polpa de seriguela.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(02)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(03)
Midilli e Kucuk	$RU = \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(04)

Sendo, RU – razão de umidade do produto, adimensional; t – tempo de secagem (min); k- coeficientes de secagem ( $\text{min}^{-1}$ ); a, b, n - constante dos modelos.

A escolha do modelo que apresentou melhor ajuste foi realizado por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), pelo erro médio padrão e pelo princípio da parcimônia (menor número de parâmetros do modelo).

### Análises físico-químicas

As amostras *in natura* foram analisadas antes de serem secas, e as amostras secas nas três temperaturas foram submetidas à análise de pH, teor de umidade, acidez e °Brix, conforme metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008). Todas as análises foram realizadas em triplicata, para maior confiabilidade nos resultados obtidos. O desvio padrão foi calculado para verificar a dispersão em torno da média.

Para a determinação do pH foram medidas 5 g de polpa de seriguela desidratada diluídas em 50 mL de água destilada. O mesmo foi determinado por meio de um pHmetro (Incoterm), previamente calibrado com solução tampão de pH 4,0 e 7,0, segundo o método 017/IV do manual do Instituto Adolfo Lutz (2008).

Para o teor de umidade foram medidas 10 g de amostra em placa de Petri, previamente secas e taradas, e colocadas em estufa a 105 °C até obtenção da massa constante, conforme metodologia 012/IV do Manual do Instituto Adolfo Lutz (2008).

A acidez total foi determinada por titulação potenciométrica com hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol/L, sendo os resultados expressos em percentual, conforme método 016/IV do manual Instituto Adolfo Lutz (2008).

O teor de sólidos solúveis totais foi determinado através da leitura direta da amostra homogeneizada em refratômetro à temperatura ambiente, e o resultado expresso em °Brix.

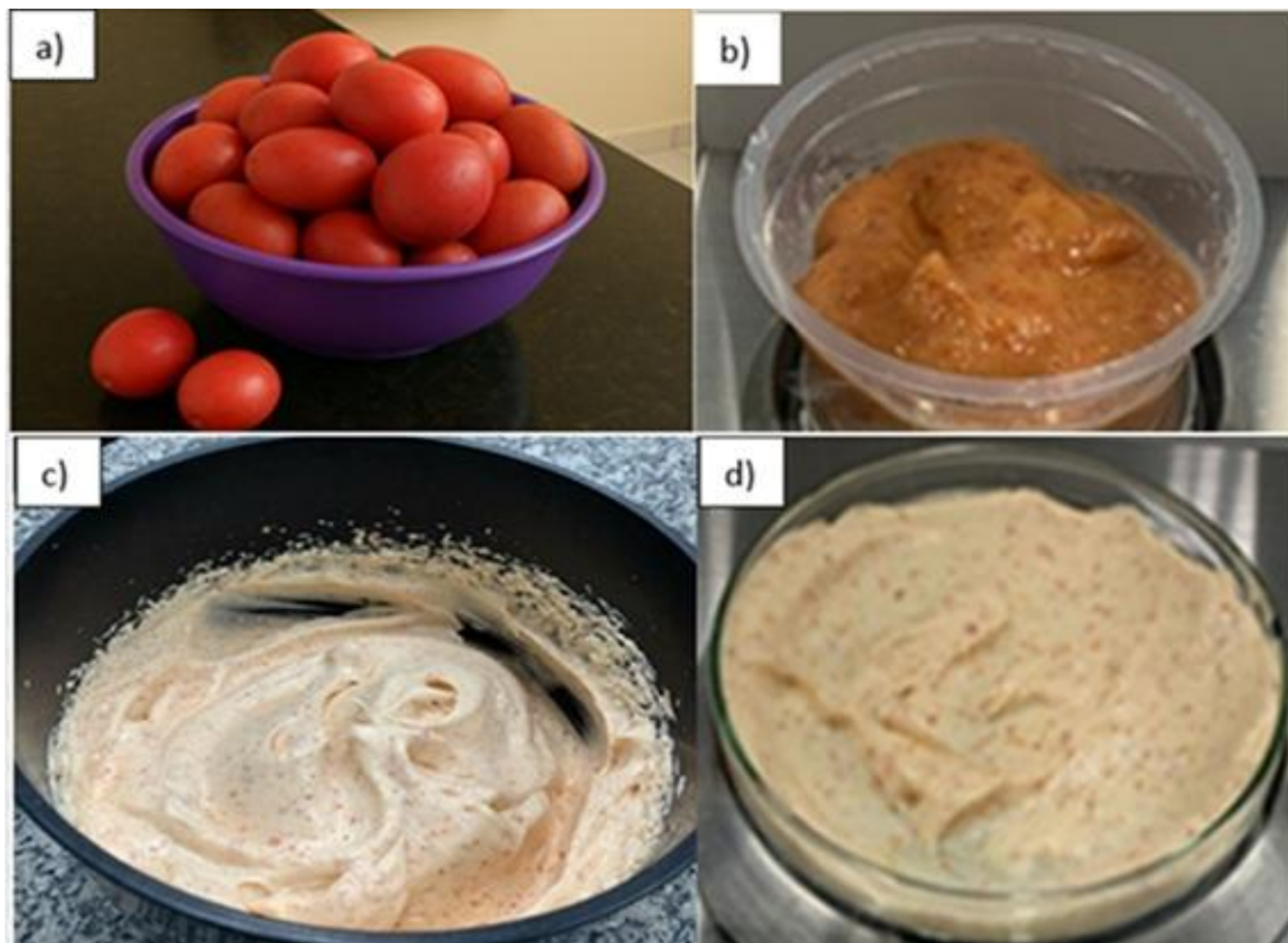
### RESULTADOS E DISCUSSÃO

As etapas de obtenção da polpa e formação de espuma por incorporação de ar têm sido amplamente aplicadas na secagem em camada de espuma (foam-mat drying) de frutas tropicais altamente perecíveis, como umbu (*Spondias tuberosa*), cajá (*Spondias mombin*) e manga (*Mangifera indica*). O processo envolve o preparo da polpa, adição de agentes espumantes e batimento mecânico para incorporação de ar, resultando em uma espuma estável e altamente porosa. Essa estrutura aumenta a área superficial de transferência de calor e massa, favorecendo a evaporação da água e reduzindo significativamente o tempo de secagem em comparação com métodos convencionais. Além disso, a técnica contribui para melhor preservação das características físico-

químicas dos produtos desidratados e maior eficiência no aproveitamento de frutas sazonais (Cardoso et al., 2024; Kalambe e Guhe, 2026).

A Figura 1 apresenta as etapas para a obtenção da espuma da polpa de seriguela, envolvendo o

processamento da fruta, padronização da polpa, adição de agente espumante e batimento mecânico para incorporação de ar. O método utilizado mostrou-se prático e de fácil execução em condições laboratoriais.



**Figura 1.** a) Frutas de seriguela *in natura*. b) Polpa da seriguela triturada. c) Espuma formada. d) Espuma distribuída na placa Petri.

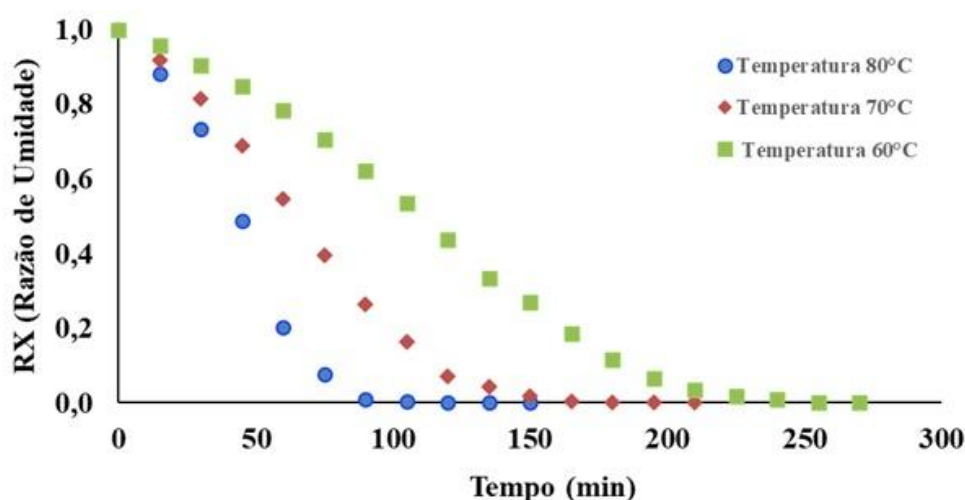
Para avaliação da cinética de secagem as amostras foram secas até que se obtivesse o material com massa constante (condições de equilíbrio).

As curvas de secagem da polpa da seriguela estão apresentadas na Figura 2, na forma adimensional da razão de umidade (RX versus o tempo). Pode-se observar que o período de secagem foi dependente do tempo e temperatura.

Observa-se que o aumento da temperatura de secagem promoveu redução significativa no tempo necessário para que as espumas da polpa de seriguela

atingissem o equilíbrio higroscópico, com valores de 250, 180 e 120 minutos para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Esse comportamento evidencia a influência direta da temperatura sobre a cinética de secagem, uma vez que temperaturas mais elevadas intensificam a transferência de calor do ar para o material.

Conseqüentemente, ocorre maior taxa de evaporação da água e aumento do gradiente de pressão de vapor entre a superfície do produto e o meio, favorecendo a remoção de umidade.



**Figura 2.** Curvas de secagem em camada de espuma da polpa de seriguela nas temperaturas de 60, 70 e 80°C.

Esse fenômeno resulta em curvas de secagem mais inclinadas, indicando maior velocidade de secagem nas temperaturas mais elevadas. Além disso, a redução do tempo de processo em temperaturas mais altas contribui para maior eficiência operacional, sendo um fator relevante na otimização de processos industriais de desidratação de polpas de frutas.

**Modelagem matemática**

Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros dos modelos matemáticos de Henderson e Pabis (1961), Midilli (2002) e Kucuk e Page (1949), ajustados aos dados experimentais da secagem da espuma da polpa de seriguela nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, além dos R<sup>2</sup> e erros médios e os parâmetros dos modelos.

**Tabela 2.** Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados para a cinética de secagem das polpas secas de seriguela nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

Modelos	Parâmetros	Temperaturas		
		60°C	70°C	80°C
<b>Modelo de Henderson e Pabis</b>	a	1,189332	1,181099	1,001278
	k (min <sup>-1</sup> )	0,009140	0,016682	0,026590
	R <sup>2</sup>	0,967590	0,972964	0,959449
	Erro	1,728452	1,074673	0,967170
<b>Modelo de Midilli e Kucuk</b>	a	0,999996	0,999926	0,999403
	b	0,000000	0,000000	0,000000
	k (min <sup>-1</sup> )	0,000158	0,000435	0,000407
	n	1,802302	1,784317	2,020707
	R <sup>2</sup>	0,997702	0,999169	0,996921
	Erro	0,491586	0,199429	0,190505
<b>Modelo de Page</b>	k (min <sup>-1</sup> )	0,000070	0,000329	0,000118
	n	1,970852	1,848192	2,314528
	R <sup>2</sup>	0,998386	0,999300	0,998677
	Erro	0,387509	0,170508	0,114956

Legenda: a, b, n parâmetros adimensionais dos modelos; k (min<sup>-1</sup>) constante de secagem, R<sup>2</sup> coeficiente de determinação, erro, erro médio padrão.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, os modelos de Page (1949) e o de Midilli e Kucuk (2002) foram os que apresentaram os melhores ajustes, em

relação aos modelos utilizados, sendo que o modelo de Page se destacou por apresentar os maiores R<sup>2</sup> e o menor erro médio estimado em todas as condições

estudadas. No estudo esperava-se encontrar pelo menos um dos modelos que se ajustasse, visto que são modelos cinéticos de secagem. Foram alcançados utilizando o modelo de Page (1949) para secagem da espuma da polpa de seriguela de 0,998386, 0,999300 e 0,998677 para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Os erros médios obtidos foram 0,387509, 0,170508, e 0,114956 para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente.

O modelo de Henderson e Pabis (1961) não representou de forma satisfatória a cinética de secagem em camada de espuma da polpa de seriguela, para nenhuma das três temperaturas avaliadas, uma vez que apresentou baixos valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e maiores erros médios em comparação aos demais modelos testados. Esse comportamento indica que o modelo não foi capaz de descrever adequadamente o processo de remoção de água da matriz estudada, evidenciando limitações na sua aplicabilidade para este tipo de material.

O não ajuste do modelo pode estar relacionado às características intrínsecas da polpa de seriguela, tais como elevada umidade inicial, presença de açúcares e compostos solúveis, além da estrutura porosa formada durante a etapa de espuma, que altera significativamente os mecanismos de transferência de massa durante a secagem. Esses fatores podem tornar o processo mais complexo e não linear, exigindo modelos matemáticos mais flexíveis para representar adequadamente a cinética de secagem.

O modelo de Henderson e Pabis (1961) apresentou maior desvio em relação aos dados experimentais, particularmente nas fases intermediárias da secagem. Desse modo, o modelo subestimou a perda de umidade, sugerindo ser menos adequado para descrever o comportamento observado no experimento, conforme observado na Tabela 2.

O modelo de Midilli e Kucuk (2002) apresentou um bom ajuste em todas as temperaturas avaliadas ficando próximo aos pontos experimentais no período de tempo estudado, demonstrando alta proximidade entre os valores preditos e os pontos experimentais ao longo do período de secagem estudado. Esse comportamento é evidenciado pelos elevados valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pelos baixos erros médios, indicando a adequação do modelo para descrever o processo. O bom desempenho do modelo pode ser atribuído à sua maior flexibilidade matemática, uma vez que

combina uma componente exponencial com um termo linear, permitindo representar com maior precisão as variações da taxa de secagem em materiais biológicos complexos, como a polpa de seriguela, especialmente quando submetida à secagem em camada de espuma.

O modelo de Page (1949) apresentou bom ajuste aos dados experimentais da cinética de secagem da polpa de seriguela nas três temperaturas estudadas, evidenciando elevada correlação entre os valores preditos e os pontos experimentais ao longo do processo. Comportamento semelhante foi observado por Riguetto et al. (2018), ao estudarem a secagem em camada de espuma da polpa de uvaia, nos quais os modelos de Midilli e Kucuk (2002) e Page (1949) também se destacaram como os que melhor representaram os dados experimentais, apresentando os melhores ajustes estatísticos. Esses resultados reforçam que tais modelos possuem maior capacidade de descrever a cinética de secagem de frutas tropicais, especialmente em sistemas complexos como a secagem em camada de espuma, devido à sua flexibilidade em representar as variações da taxa de secagem ao longo do tempo. O modelo de Page apresentou o melhor desempenho na representação do processo de secagem da polpa de seriguela, assim como na polpa de umbu pelo trabalho de Silva et al. (2021).

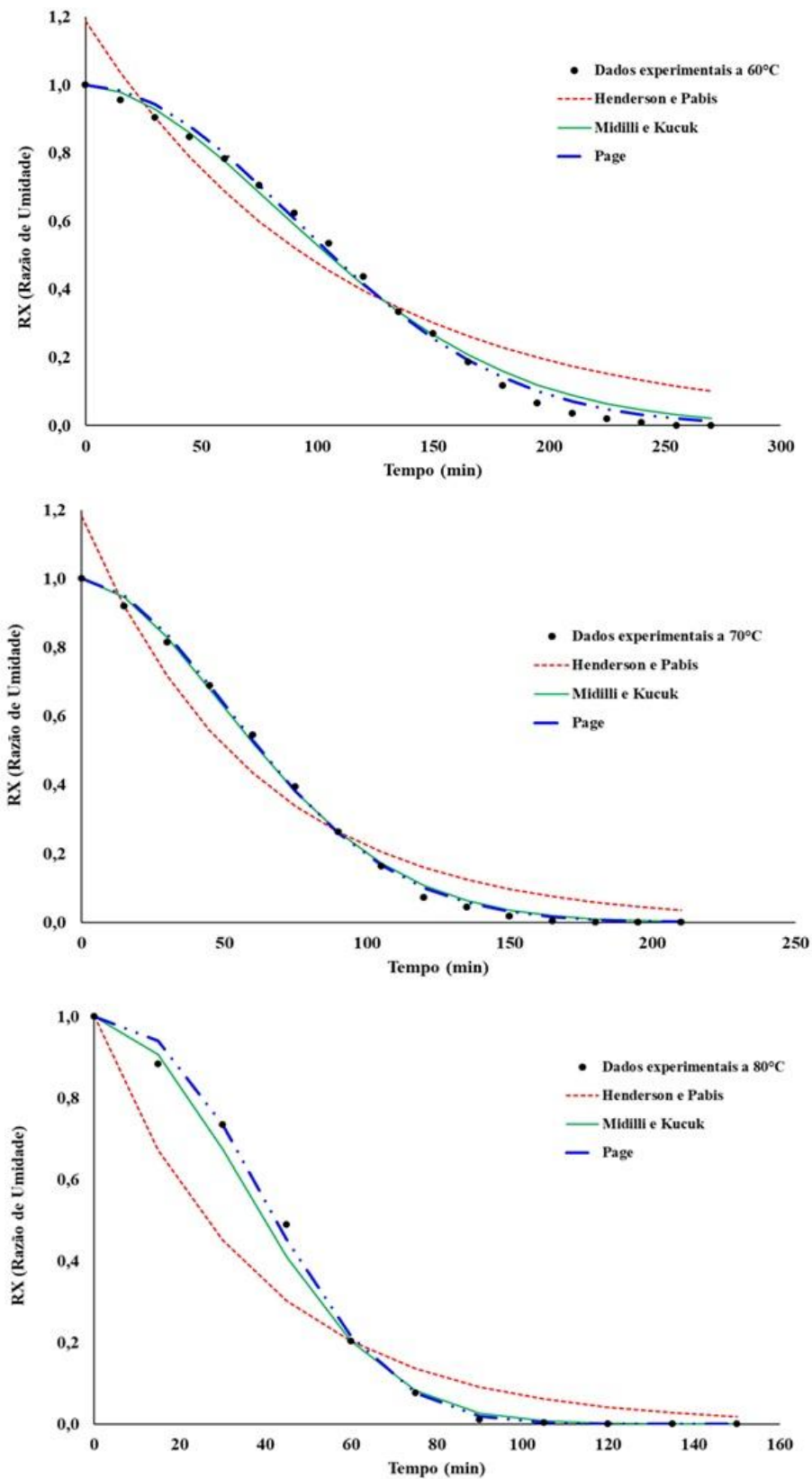
A semelhança nos valores de ajuste pode ser atribuída ao fato de a seriguela e o umbu possuírem características físico-químicas similares, refletindo comportamentos cinéticos de secagem comparáveis em processos de secagem em camada de espuma. Estudos envolvendo polpas de frutas tropicais têm demonstrado que modelos matemáticos empíricos e semiempíricos, como os modelos de Page (1949) e de Midilli (2002), apresentam elevada capacidade preditiva na descrição da remoção de umidade, com altos coeficientes de determinação e baixos valores de erro médio relativo (Dórigos et al., 2022; Silva et al., 2021).

Segundo Samapundo et al. (2007), valores de erro médio relativo inferiores a 10% indicam boa adequação do modelo para aplicações práticas, sendo esse critério amplamente utilizado como referência na avaliação do ajuste de modelos matemáticos aplicados à secagem de alimentos, especialmente em produtos de origem vegetal. Esse parâmetro tem sido recorrente em estudos recentes de modelagem da cinética de secagem, nos quais o erro relativo é

empregado como indicador complementar ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para validar a capacidade preditiva dos modelos utilizados (Samapundo et al., 2007; Costa et al., 2022).

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas ajustadas segundo o modelo de Henderson e Pabis (1961), Midilli e Kucuk (2002) e Page (1949) nas condições 60, 70, 80°C, respectivamente, aos dados experimentais da cinética de secagem da espuma da polpa de seriguela.

A partir da análise dos ajustes dos modelos, verificou-se que o modelo de Page apresentou o melhor desempenho cinético em todas as temperaturas avaliadas, e pelo princípio da parcimônia possui o menor número de parâmetros, sendo o mais adequado para descrever a cinética de secagem da polpa de seriguela, bem como um dos modelos mais utilizados para descrever o comportamento da secagem.



**Figura 3.** Ajustes dos modelos de Henderson e Pabis, Midilli e Kucuk e Page para secagem em camada de espuma da polpa de seriguela. a) T = 60°C; b) T = 70°C; c) T = 80°C.

**Análise físico-químicas da polpa *in natura* e secas**

Os parâmetros avaliados para a obtenção das características físico-química da polpa *in natura* e das

polpas secas produzidas a partir da espuma da polpa de seriguela secas nas temperaturas de 60, 70 e 80°C, estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Caracterização físico-química da polpa de seriguela *in natura* e após secagem em camada de espuma.

Análise	Polpa <i>in natura</i>	Polpa secas		
		60°C	70°C	80°C
SST (°Brix)	10,00 ± 0,00			
Umidade (%)	87,17 ± 0,00	15,66 ± 0,006	12,92 ± 0,026	12,25 ± 0,004
ATT (%)	00,22 ± 0,00	01,04 ± 0,041	01,08 ± 0,041	01,15 ± 0,033
pH	03,14 ± 0,01	03,12 ± 0,009	03,13 ± 0,000	03,15 ± 0,000

Legenda: SST: teor de sólidos solúveis; ATT: acidez total.

O teor de sólidos solúveis (°Brix) obtido na análise físico-química da polpa de seriguela *in natura* foi de 10 °Brix, valor próximo ao observado por Neris et al. (2017), que registraram 11,03 °Brix. Estudos mais recentes com a seriguela também relatam valores na faixa de 9 a 12 °Brix, a depender do estágio de maturação e das condições edafoclimáticas (Sousa et al., 2023; Silva et al., 2025).

O valor de 10 °Brix observado para a polpa de seriguela *in natura* encontra-se dentro da faixa considerada adequada para frutos maduros, sendo compatível com dados da literatura, que relatam variações típicas entre 9 e 12 °Brix para a espécie, dependendo do estágio de maturação e das condições de cultivo. Esse teor indica bom grau de maturação e qualidade tecnológica satisfatória para processamento, especialmente em operações como desidratação e secagem em camada de espuma, nas quais o equilíbrio entre sólidos solúveis e propriedades físico-químicas da polpa influencia diretamente o comportamento do material durante o processo (Neris et al., 2017; Sousa et al., 2023; Silva et al., 2025).

A umidade da polpa *in natura* encontrada neste trabalho foi de 87,17%, valor semelhante ao observado por Neris et al. (2017), que reportaram 87,19% para polpa de seriguela. Resultados recentes também indicam que frutos de *Spondias purpurea* L. apresentam teor de umidade superior a 85% na fase madura, característica típica de frutas tropicais com elevada atividade metabólica (Silva et al., 2025; Sousa et al., 2023).

Com o aumento da temperatura de secagem, observou-se redução gradual do teor de umidade, passando de 15,66% a 60 °C para 12,25% a 80 °C. Esse comportamento confirma que temperaturas mais elevadas intensificam o gradiente de pressão de vapor

entre o produto e o meio, favorecendo maior taxa de difusão de água e redução do tempo de secagem, conforme descrito por Silva et al. (2025) em estudos de modelagem da cinética de secagem de polpas e farinhas de seriguela.

A menor umidade final implica redução da atividade de água, promovendo maior estabilidade microbiológica e prolongamento da vida útil do produto desidratado. Zhao et al. (2025) demonstram que a diminuição da atividade de água para valores inferiores a 0,60 limita significativamente o crescimento microbiano e reduz reações deteriorativas. Além disso, a baixa umidade contribui para a preservação das características físico-químicas e estruturais do produto seco, mantendo sua qualidade durante o armazenamento (Mujumdar, 2006), fatores que contribuem para a qualidade dos alimentos e são fundamentais para a indústria.

O pH da polpa *in natura*, apresentou valor médio de 3,14, enquanto a acidez titulável total foi de 0,22%, valores semelhantes aos encontrados por Neris et al. (2017) utilizando a polpa de seriguela. Valores de pH entre 2,8 e 3,5 também foram relatados em estudos de caracterização físico-química de *Spondias purpurea* L., confirmando o caráter naturalmente ácido do fruto (Sousa et al., 2023; Silva et al., 2025).

Em razão da remoção de grande parte da água presente na amostra, foi verificado que o processo de secagem concentrou a acidez das amostras da polpa em pó, de modo em que a polpa *in natura* obteve um valor menor (0,22%) comparado com as polpas que passaram pelo processo de secagem Neris et al. (2017), assim como observado no trabalho do Rigueto et al. (2018) sobre a secagem em camada de espuma da polpa de uvaia. Os resultados são coerentes e, em geral, indicam bons estados de

conservação, porém dependem do grau de maturação do fruto, Riguetto et al., 2018).

O pH da polpa de seriguela in natura foi de  $3,14 \pm 0,01$ , enquanto as polpas submetidas à secagem apresentaram pouca variação entre os tratamentos avaliados, com valores de  $3,12 \pm 0,009$ ;  $3,13 \pm 0,00$  e  $3,15 \pm 0,00$  para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Esses resultados indicam estabilidade do potencial hidrogeniônico ao longo do processo de secagem, sugerindo que não ocorreram alterações significativas na concentração de íons hidrogênio durante o tratamento térmico, o que é esperado em processos de desidratação, indicando que o processo de secagem não promoveu alterações significativas na acidez do produto.

A manutenção do pH após a secagem é tecnologicamente relevante, uma vez que a acidez elevada contribui para a estabilidade microbiológica, reduzindo o risco de crescimento de microrganismos patogênicos e deteriorantes (Fellows, 2017). Além disso, alimentos com pH inferior a 4,5 são classificados como ácidos, condição que favorece maior segurança e vida útil do produto desidratado (Damodaran et al., 2017).

Essa pequena oscilação sugere que o tratamento térmico não afetou de forma relevante o equilíbrio ácido da polpa, contribuindo para a preservação de seu sabor e acidez característicos. A estabilidade observada pode estar relacionada à resistência dos ácidos orgânicos presentes na fruta ao processo de aquecimento (Fellow, 2017).

## CONCLUSÃO

A técnica de secagem em camada de espuma mostrou-se como uma abordagem eficaz e promissora para a conservação da polpa de seriguela, oferecendo uma solução importante para reduzir as perdas pós-colheita de uma fruta de alta perecibilidade. Por sua vez, o processo de secagem permitiu a obtenção de um produto com baixa umidade, mantendo as características físico-químicas essenciais, como pH e acidez titulável, que são determinantes para preservar a qualidade sensorial e nutricional da fruta.

A análise da cinética de secagem revelou que o tempo necessário para alcançar a condição de equilíbrio diminuiu com o aumento da temperatura, sendo a secagem a 80°C a mais eficiente, o modelo de Page apresentou o melhor ajuste para os dados experimentais em todas as temperaturas testadas,

seguido pelo modelo de Midilli e Kucuk, ambos adequados para descrever o comportamento da secagem.

Portanto, a secagem em camada de espuma da polpa de seriguela surge como uma alternativa eficaz e de baixo custo para o aproveitamento de frutas tropicais, contribuindo para o aumento da vida útil do produto, redução do desperdício alimentar e valorização dos produtos nacionais.

## AGRADECIMENTOS

A Universidade do Estado de Mato Grosso - Unemat.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAFRUTAS (2025). Associação brasileira dos produtores exportadores de frutas e derivados. **Produção de frutas brasileiras**. Disponível em: <https://abrafrutas.org/paineis-de-producao/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

Araújo, W. M. C.; Montibello, N. di P.; Venturini Filho, W. G. **Dicionário de ciência & tecnologia de alimentos (C&TA)**. São Paulo: Blucher, 2024. ISBN 978-85-212-2449-5.

Cardoso, C. E. F. et al. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2159922>

CEAGESP - Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo. Centro de Qualidade, Pesquisa e Desenvolvimento. **A medida da doçura das frutas**. Cartilha Técnica 08. São Paulo. 2016, 17 p.

Costa, J. S. et al. Mathematical modeling of thin-layer drying of agricultural products: evaluation of model performance criteria. *Drying Technology*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1885442>

Damodaran, S.; Parkin, K. L.; Fennema, O. R. **Fennema's Food Chemistry**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

Dórigos, A. P. L. de M. et al. Mathematical models to describe the foam mat drying process of cumbeba pulp (*Tacinga inamoena*) and product quality. *Foods*, v. 11, n. 12, p. 1751, 2022. DOI: [10.3390/foods11121751](https://doi.org/10.3390/foods11121751)

- Erbay, Z.; İcier, 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/10.1080/10408398.2020.1847607>
- FAO. (2024). **Organização das nações unidas para a agricultura e alimentação**. Faostat. Divisão de estatística, 2024. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/pt/>>. Acesso em: 21 jan. 2025
- Food And Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems*. <https://www.fao.org/brasil/pt/>
- Fellows, W, P. *Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática*. 3. d. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- FOOD SAFETY INSTITUTE. (2026). Methods and benefits of food drying and dehydration. Disponível em: <https://foodsafety.institute/food-fundamentals-chemistry/methods-benefits-food-drying-dehydration/>. Acesso em: 20 fev. 2026.
- Freitas, B. S. M. de; Cavalcante, M. D.; Cagnin, C.; Silva, R. M. da; Plácido, G. R.; Oliveira, D. E. C. de. *Physical-chemical characterization of yellow mombin (Spondias mombin L.) foam-mat drying at different temperatures*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 430-435, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p430-435>
- Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz. 2008.
- Kalambe, S.; Guhe, S. *Sustainable Food Technology*, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1039/D5FB00203F>
- 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>
- Midilli, A.; Kucuk, H. *Mathematical modeling of thin layer drying of foods: recent applications*. *Drying Technology*, v. 40, 2002.
- Mujumdar, A. S. *Handbook of industrial drying*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- Neris, T. S., Loss, R. A., & Guedes, S. F. Caracterização físico-química da seriguela (*Spondias purpurea* L.) coletadas no município de Barra do Bugres/MT em diferentes estágios de maturação. *Natural Resources*, 7(1), 9–18., 2017. <http://doi.org/10.6008/SPC2237-9290.2017.001.0002>
- Programa das Nações Unidas para o meio ambiente (PNUMA). *Food Waste Index Report 2024*. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2024.
- 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**. *Scientia Agraria Paranaensis*, v. 20, n. 4, p. 329–334, 1 out. 2018. <https://doi.org/10.22409/engevista.v20i4.9540>
- Samapundo, S.; Devleghere, F.; De Meulenaer, B.; Atukwase, A.; Lamboni, Y.; Debevere, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering*, v. 79, n. 1, p. 168–175, 2007. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040
- Santos, P. H. S. et al. 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>
- Silva Filho, E. D.; Figueiredo, R. M. F.; Queiroz, A. J. M.; Guimarães, M. K. A. *Drying kinetics in foam layer of mango flesh cv. Haden. Comunicata Scientiae*, v. 7, n. 3, p. 354–361, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v7i3.1467>
- Silva, A. B. S. E.; Rodrigues, M. C.; Silva, E. G. Da; Rigo, L.; Oliveira, M. P. De; Geraldi, C. A. Q. *Influência da temperatura de secagem em camada de espuma nas propriedades físico-químicas da polpa de umbu (*Spondias tuberosa*)*. In: I WEB, 2018.
- Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S.; Gama, F. J. A.; Gomes, J. P.; Silva, D. D. P. S. **Mathematical modeling of foam-mat drying of tropical fruit pulps**. *Journal of Food Process Engineering*, v. 44, 2021. DOI: 10.1111/jfpe.13795.

Silva, A. G. F.; Nascimento, E. M. S.; Souza, E. P.; Silva, W. P.; Gomes, J. P. **Spondias purpurea L. fruits flours at different maturation stages: drying kinetics, mathematical modelling, characterization and correlation analysis.** *Heliyon*, v. 11, e41832, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41832>.

Sousa, E. P.; Nascimento, E. M. S.; Silva, A. G. F.; Silva, W. P.; Gomes, J. P. **Physicochemical**

**characterization and postharvest quality of *Spondias purpurea* L. fruits.** *Food Chemistry Advances*, v. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100XXX>.

Zhao, C.; Liu, Y.; Wang, M.; Zhang, H.; Chen, L. **Drying methods affect nutritional value, amino acids, bioactive compounds, and in vitro function of extract in mulberry leaves.** *Food Chemistry*, v. 481, p. 144018, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144018>.