v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

SECAGEM DO LEITELHO EM CAMADA DE ESPUMA: MODELAGEM MATEMÁTICA E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

FOAM-MAT DRYING OF BUTTERMILK: MATHEMATICAL MODELING AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION

SECADO DE SUERO DE MANTEQUILLA EN CAPA DE ESPUMA: MODELADO MATEMÁTICO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

Gabriella Yuka da Silva Itino[1], Mayara de Souza Queirós[2], Guilherme de Figueiredo Furtado[3]

e7109135
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9135

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

O leitelho é um subproduto da fabricação da manteiga que apresenta potencial de aproveitamento pela indústria de alimentos, principalmente em razão de sua composição nutricional e funcional. Nesse contexto, este estudo avaliou a secagem do leitelho pelo método de camada de espuma, considerando a cinética de secagem, o ajuste de modelos matemáticos e a caracterização físico-química dos pós obtidos nas temperaturas de 60 e 80 °C. A espuma foi submetida à secagem em estufa com circulação de ar durante três horas. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Page e Thompson. Entre os modelos avaliados, o modelo de Page apresentou o melhor ajuste, com coeficientes de determinação acima de 0,999 e desvio padrão da estimativa inferior a 0,003, para ambas as temperaturas. Além disso, a secagem a 80 °C proporcionou maior velocidade de remoção de água, menor atividade de água e menor teor de umidade final. Os pós obtidos apresentaram atividade de água de 0,66 e 0,62 e umidade de 9,61 e 8,58% para 60 e 80 °C, respectivamente. O pH não apresentou diferença significativa entre a espuma e os pós, enquanto os teores de cinzas e proteínas foram ligeiramente superiores no produto seco a 60 °C. Já os teores de lipídios não diferiram significativamente entre as temperaturas avaliadas. Dessa forma, a secagem em leito de espuma mostrou-se eficiente para a obtenção de leitelho em pó, contribuindo para sua possível aplicação como ingrediente em formulações alimentícias.

PALAVRAS-CHAVE: Leitelho. Secagem em camada de espuma. Cinética de secagem. Modelagem matemática. Subprodutos lácteos.

ABSTRACT

Buttermilk is a butter-making byproduct with potential for use in the food industry, primarily due to its nutritional and functional composition. In this context, this study evaluated buttermilk drying using the foam-mat method, considering drying kinetics, mathematical model fitting, and the physicochemical characterization of powders obtained at 60 °C and 80 °C. The foam was dried in an air-circulating oven for three hours. Experimental data were fitted to the Diffusion Approximation, Two-Term, Page, and Thompson models. Among the models evaluated, the Page model showed the best fit, with coefficients of determination above 0.999 and a standard error of estimate below 0.003 for both temperatures.

[1]UFSCar, Graduanda em Engenharia de Alimentos.
[2]UFSCar, Doutora em Engenharia de Alimentos.
[3]UFSCar, Doutor em Engenharia de Alimentos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Furthermore, drying at 80 °C resulted in a higher water removal rate, lower water activity, and lower final moisture content. The resulting powders exhibited water activity values of 0.66 and 0.62 and moisture contents of 9.61% and 8.58% for 60 °C and 80 °C, respectively. There was no significant difference in pH between the foam and the powders, whereas ash and protein contents were slightly higher in the product dried at 60 °C. Lipid content did not differ significantly between the temperatures evaluated. Thus, foam-mat drying proved efficient for producing buttermilk powder, supporting its potential application as an ingredient in food formulations.

KEYWORDS: *Buttermilk. Foam-mat drying. Drying kinetics. Mathematical modeling. Dairy by-products.*

RESUMEN
El suero de mantequilla es un subproducto de la elaboración de mantequilla que presenta potencial de aprovechamiento en la industria alimentaria. El presente estudio evaluó el secado del suero de mantequilla mediante el método de capa de espuma, considerando la cinética de secado, el ajuste a modelos matemáticos y la caracterización fisicoquímica de los polvos obtenidos a temperaturas de 60 y 80 °C. La espuma se sometió a secado en estufa con circulación de aire durante tres horas. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Aproximación de la Difusión, Dos Términos, Page y Thompson. Entre los modelos evaluados, el modelo de Page presentó el mejor ajuste, con coeficientes de determinación superiores a 0,999 y una desviación estándar de la estimación inferior a 0,003 para ambas temperaturas. Además, el secado a 80 °C permitió una mayor velocidad de eliminación de agua, así como una menor actividad de agua y un menor contenido de humedad final. Los polvos obtenidos presentaron una actividad de agua de 0,66 y 0,62, y una humedad del 9,61 % y 8,58 % para 60 y 80 °C, respectivamente. El pH no mostró diferencias significativas entre la espuma y los polvos, mientras que los contenidos de cenizas y proteínas fueron ligeramente superiores en el producto secado a 60 °C. Por otro lado, los contenidos de lípidos no difirieron significativamente entre las temperaturas evaluadas. De este modo, el secado en lecho de espuma resultó eficiente para la obtención de suero de mantequilla en polvo.

PALABRAS CLAVE*: Suero de mantequilla. Secado en capa de espuma. Cinética de secado. Modelado matemático. Subproductos lácteos.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de leite e seus derivados, constituindo, portanto, uma das principais atividades econômicas do país. A produção de leite, juntamente com seus derivados, tem uma ampla aceitação tanto no âmbito nacional quanto internacional, desempenhando um papel crucial na economia global, especificamente no desenvolvimento socioeconômico do Brasil (Assis et al., 2016). Neste contexto, a produção de leite se faz presente em todo o país, concentrando-se em bacias leiteiras tradicionais, tais como os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Goiás (Carvalho; Cicarini, 2007).

No que tange ao processo de beneficiamento do leite, na indústria de laticínios surgem subprodutos que ainda são pouco explorados. Por sua vez, a maioria desses produtos desenvolvidos tem como objetivo o aproveitamento máximo dos componentes do leite, e a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

consequente redução do impacto ambiental ao evitar desperdícios (Oliveira et al., 2024). Na indústria de alimentos, por exemplo, a produção de manteiga se destaca como um dos principais produtos derivados do leite (Souza et al., 2023), e a partir dela é gerado o leitelho. Ao realizar o batimento do creme de leite, ocorre o rompimento dos glóbulos de gordura presentes e, consequentemente, se tem a liberação de triacilglicerídeos para a formação da manteiga, com separação de uma fase líquida denominada leitelho.

Com exceção das frações lipídicas, o leitelho possui composição similar à do leite desnatado, o que faz dele um ingrediente com ótimo valor nutricional e com alta funcionalidade na indústria (Lambert et al., 2016). Quando comparado ao leite desnatado, ao leite integral e ao creme, o leitelho possui altas concentrações de lipídios polares. Além disso, esses lipídios são compostos principalmente de fosfolipídios e esfingolipídios, os quais tornam o leitelho um excelente emulsificante e ingrediente funcional (Pfrimer, 2018).

Em função de sua composição proteica e lipídica, o aproveitamento do leitelho pode apresentar uma série de vantagens, e uma das maneiras de realizar esse aproveitamento é por meio da secagem. Dentre os métodos de conservação, a secagem apresenta vantagens significativas no que tange ao prolongamento da vida útil do produto, visto que a tecnologia possibilita, através da retirada de água, a redução da velocidade das reações de degradação e a redução da proliferação de microrganismos que possam afetar os aspectos sensoriais e nutricionais do alimento. No entanto, o processo convencional de secagem pode apresentar elevado custo e maior complexidade de operação, dificultando sua adoção por pequenos e médios produtores. Nesse contexto, torna-se relevante a busca por novas alternativas de processamento, bem como a adaptação de técnicas já existentes, como a secagem em camada de espuma (Baptestini et al., 2021).

O processo de secagem em camada de espuma se baseia na desidratação de alimentos líquidos e semilíquidos, na qual o alimento é convertido em uma espuma estável e para este quesito, estabilizantes e emulsificantes também podem ser adicionados (Vimercati et al., 2019). Posteriormente, a espuma é distribuída sobre uma superfície, formando, geralmente, uma camada com espessura entre 2 e 5 mm. Após a secagem, obtém-se um produto de estrutura porosa e textura quebradiça, que pode ser facilmente moído e convertido em pó, apresentando, ainda, boas características de reidratação (Bastos et al., 2005). Todo o processo acontece de maneira rápida, não expondo o alimento ao calor por muito tempo e isso faz com que se tenha uma preservação nas características sensoriais e nutricionais do produto quando comparado a outros métodos intensivos de calor (Fellows, 2006).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O estudo de sistemas de secagem pode ser realizado por meio de simulações matemáticas, utilizando modelos capazes de representar de forma satisfatória a redução do teor de umidade do produto ao longo do processo. Essa abordagem possibilita a análise e a otimização das condições de secagem, contribuindo também para o aprimoramento dos equipamentos empregados nesse processo (Ogata, 2003). Diversos modelos matemáticos são encontrados na literatura para descrever a cinética de secagem de produtos de origem vegetal. Esses modelos permitem estimar o tempo necessário para a secagem de diferentes produtos, além de possibilitarem a construção e análise das respectivas curvas de secagem (Midilli et al., 2002).

Desta forma, objetivou-se avaliar a cinética de secagem do leitelho em camada de espuma em diferentes temperaturas (60 e 80 °C) e caracterizar físico-quimicamente os pós obtidos, visando uma possível aplicação em produtos alimentícios e suplementos alimentares.

2. METODOLOGIA

2.1. Matéria-prima

O leitelho utilizado para obtenção da espuma e posterior secagem foi gentilmente cedido por um laticínio localizado na cidade de Campina do Monte Alegre (SP). Após a obtenção, o leitelho foi acondicionado em garrafas e armazenado em freezer a −18 °C até o momento de ser utilizado (5 dias após a coleta). O emulsificante Emustab (Selecta, Duas Rodas Ind.) foi utilizado para auxiliar no preparo da espuma. Os demais reagentes eram de grau analítico.

2.2. Preparo da espuma

Para a formação da espuma, aproximadamente 400 mL de leitelho, contendo 2% m/m de emulsificante comercial Emustab (emulsificante composto de monoglicerídeos destilados, monoestearato de sorbitana e polissorbato 60) foram adicionados a uma batedeira (BBT 500 Inox, Britânia) e submetidos ao batimento em velocidade média (228 rpm) durante 10 minutos.

2.3. Secagem da espuma

A espuma obtida foi disposta em bandejas de alumínio (10x10 cm) em camada de 0,2 cm de espessura, e na sequência, submetida ao processo de secagem em estufa com circulação de ar (modelo FCD-3000 - OLIDEF). A secagem foi conduzida, em triplicata, nas temperaturas de 60 °C e 80 °C, por um período de 3 horas, sendo o registro das massas realizado a cada 10 minutos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Após esse período, o material obtido foi removido das bandejas com auxílio de espátula, promovendo a fragmentação do conteúdo até a obtenção de um produto em pó.

2.4. Cinética e modelagem matemática da secagem

A cinética de secagem foi avaliada por meio da razão de umidade adimensional em função do tempo. Para tanto, os dados experimentais obtidos nas temperaturas de 60 e 80 °C foram ajustados aos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão (1), Dois Termos (2), Page (3) e Thompson (4), cujas equações são apresentadas na Tabela 1. Desse modo, tornou-se possível comparar a capacidade de cada modelo em representar o comportamento da remoção de água durante a secagem do leitelho em leito de espuma.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para predizer o comportamento da secagem

Modelo	Equação
(1)	$RU = a \times exp(-kt) + (1-a) \times exp(-kbt)$
(2)	$RU = a \times exp(-k_0 t) + b \times exp(-k_1 t)$
(3)	$RU = exp(-kt^n)$
(4)	$RU = exp((-a - (a^2 + 4bt)^{0,5})/2b)$

Em que: RU, razão de umidade do produto, adimensional; t, tempo de secagem, s, h; k, k_0, k_1, coeficientes de secagem; a, b, c, n, constantes dos modelos.

A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio padrão da estimativa (SE), calculado conforme apresentado na Equação 5.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Yo)2}{GLR}} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Em que: Y, valor observado experimentalmente; Y_0, valor calculado pelo modelo e GLR, graus de liberdade do modelo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.5. Difusividade efetiva e energia de ativação

Além do ajuste dos modelos matemáticos, a difusividade efetiva da água foi determinada com base na segunda lei de Fick, considerando-se a geometria de uma camada plana. Para tanto, utilizaram-se os valores de razão de umidade, o tempo de secagem e a espessura da camada de espuma, conforme a Equação 6.

$$RU = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} exp\left[-(2n+1)^2\right] \times \pi^2 \times \frac{Def \times t}{4 \times L^2_0} \quad \text{(Eq. 6)}$$

Em que: D_{ef}, corresponde à difusividade efetiva, em m² s⁻¹; L_0, à espessura da camada de produto (m) e n ao número de termos da série.

Dessa maneira, foi possível avaliar a influência da temperatura sobre o transporte interno de umidade durante a secagem.

Posteriormente, a dependência da difusividade efetiva em relação à temperatura foi descrita por meio de uma equação do tipo Arrhenius, apresentada na Equação 7.

$$D_{ef} = D_0 \times e^{-\left(\frac{Ea}{R \times T}\right)} \quad \text{(Eq. 7)}$$

Em que: D_0 representa o fator pré-exponencial, em m² s⁻¹; E_a, a energia de ativação, em J mol⁻¹; R, a constante universal dos gases, equivalente a 8,314 J mol⁻¹ K⁻¹; e T, a temperatura absoluta, em Kelvin.

2.6. Análises físico-químicas

A espuma de leitelho e os pós obtidos após a secagem nas temperaturas de 60 e 80 °C foram submetidos às determinações de atividade de água, pH, umidade, cinzas, proteínas e lipídios, conforme metodologias descritas ou adaptadas do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). As análises foram realizadas em triplicata e, posteriormente, os resultados foram expressos como média e desvio padrão. Desse modo, tornou-se possível comparar as características da espuma antes da secagem com aquelas apresentadas pelos produtos secos, bem como verificar os efeitos das diferentes temperaturas sobre a composição físico-química do material.

2.6.1. Determinação da atividade de água

A atividade de água das amostras foi determinada por leitura direta no equipamento Aqualab (SERIES 4/DEW POINT) previamente calibrado conforme as recomendações do fabricante. Para isso,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

uma quantidade suficiente de cada amostra foi acondicionada no recipiente de leitura (1 g), evitando-se espaços excessivos e o contato do material com os componentes internos do equipamento.

2.6.2. Determinação do pH

Para a determinação do pH, as amostras foram preparadas e homogeneizadas em água destilada. Em seguida, realizou-se a leitura em pHmetro previamente calibrado (MPA 210, MS TECNOPON). Assim, tornou-se possível verificar se o processo de secagem e as temperaturas empregadas promoveram alterações na acidez do leitelho.

2.6.3. Determinação da umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico, mediante secagem das amostras em estufa a 105 °C até a obtenção de massa constante. Posteriormente, a umidade foi calculada com base na perda de massa observada durante o aquecimento através da Equação 8.

$$Umidade\ \%\ (\frac{m}{m}) = \frac{100xN}{P} \quad \text{(Eq. 8)}$$

Em que: N é a massa de água perdida durante a secagem, em gramas e P a massa da amostra, também em gramas.

2.6.4. Determinação de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, as amostras foram pesadas em cadinhos previamente aquecidos e tarados. Na sequência, realizou-se a carbonização do material, seguida da incineração em mufla até a obtenção de um resíduo mineral. O teor de cinzas foi calculado conforme demonstrado na Equação 9.

$$Cinzas\ \%\ (\frac{m}{m}) = \frac{100xN}{P} \quad \text{(Eq. 9)}$$

Em que: N é a massa de resíduo mineral, em gramas e P é a massa da amostra, também em gramas.

2.6.5. Determinação de proteínas

O teor de proteínas foi determinado pelo método de Kjeldahl, a partir da quantificação do nitrogênio total presente nas amostras. Inicialmente, o material foi submetido às etapas de digestão, destilação e titulação. Posteriormente, o teor de nitrogênio foi convertido em proteína mediante a aplicação do fator de conversão (6,38), conforme apresentado na Equação 10.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$Proteínas\ \% = \frac{KxVx6{,}38}{P} \quad \text{(Eq. 10)}$$

Em que: K corresponde ao produto entre o fator de correção (0,014) para o ácido clorídrico (0,1 mol/L); V é o volume da solução de ácido gasto na titulação e P é a massa da amostra, em gramas.

2.6.6. Determinação de lipídios

Por sua vez, o teor de lipídios foi determinado por extração pelo método de Goldfish. Após a extração da fração lipídica com solvente apropriado, o solvente foi removido e o resíduo obtido foi quantificado por pesagem. O teor de lipídios foi calculado conforme apresentado na Equação 11.

$$Lipídios\ \% = \frac{massa\ de\ lipídios x100}{massa\ da\ amostra} \quad \text{(Eq. 11)}$$

Em que: massa de lipídios (g) é a massa da fração lipídica obtida após a evaporação do solvente e a massa da amostra refere-se à massa inicial considerada, em gramas.

2.7. Análise estatística

As análises estatísticas e os ajustes dos modelos matemáticos foram realizados com o auxílio do software Statistica 7.0. Os resultados das análises físico-químicas obtidas em triplicata foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando identificadas diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se um nível de significância de 5%. Os parâmetros dos modelos matemáticos foram estimados por regressão não linear, utilizando-se o método de otimização Quasi-Newton.

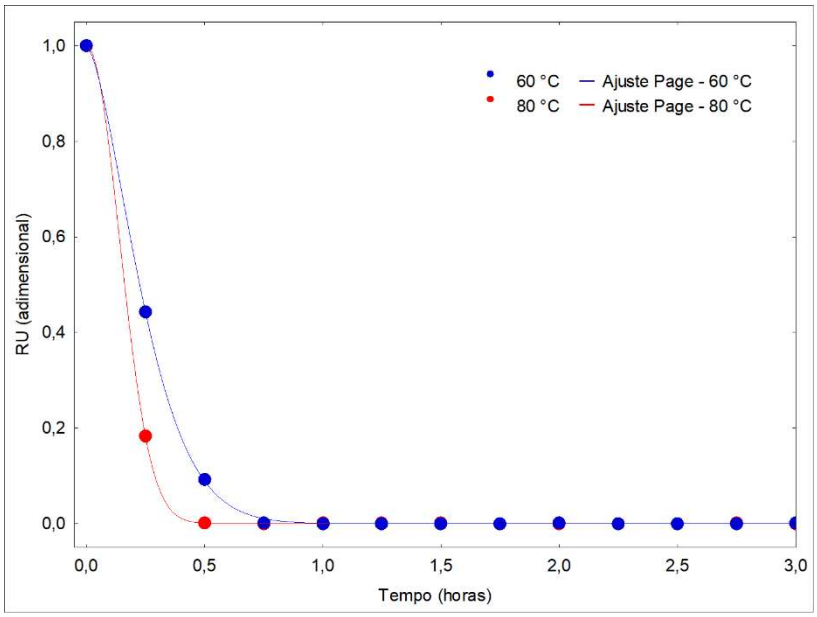
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cinética de secagem e ajuste dos modelos matemáticos

O comportamento das curvas de secagem da espuma de leitelho nas temperaturas de 60 e 80 °C, expressas pela razão de umidade adimensional em função do tempo, é apresentado na Figura 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Cinética de secagem da espuma de leitelho nas temperaturas de 60 e 80 °C



Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Conforme apresentado na Figura 1, observou-se uma redução acentuada da razão de umidade da espuma de leitelho nos períodos iniciais da secagem, sendo esse comportamento mais pronunciado na temperatura de 80 °C.

De forma semelhante, Fu et al. (2012), ao avaliarem a cinética de secagem de leite desnatado, verificaram a influência da temperatura sobre a evolução da remoção de água durante o processo. Nesse sentido, os autores observaram que a elevação da temperatura favoreceu uma maior remoção de água, evidenciando a importância da variável na condução da secagem de produtos lácteos. Esse comportamento, por sua vez, está relacionado ao maior fornecimento de energia ao produto, favorecendo a evaporação da água.

Além disso, vê-se que a influência da temperatura observada no leite desnatado também se manifesta no presente estudo, uma vez que a elevação da temperatura de 60 para 80 °C proporcionou uma redução mais rápida da razão de umidade da espuma de leitelho, sobretudo nos períodos iniciais da secagem.

Desse modo, os resultados obtidos reforçam a importância da temperatura na cinética de secagem de matrizes lácteas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados, respectivamente, os valores do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio padrão da estimativa (SE), bem como os parâmetros obtidos a partir do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem do leitelho.

Tabela 2. Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio padrão da estimativa (SE), calculados para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais da secagem do leitelho nas temperaturas de 60 e 80 °C

Modelos	**60 °C**		**80 °C**	
	R^2	SE	R^2	SE
Aproximação da Difusão	0,9977	0,016	0,9998	0,023
Dois Termos	0,9956	0,026	0,9996	0,030
Page	0,9999	0,003	0,9999	0,001
Thompson	0,9965	0,020	0,9882	0,027

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Conforme apresentado na Tabela 2, a qualidade dos ajustes foi avaliada considerando valores de R^2 próximos de 1 e menores valores de SE. Nesse sentido, o modelo de Page apresentou o melhor desempenho, com R^2 de 0,9999 nas duas temperaturas e SE de 0,003 a 60 °C e 0,001 a 80 °C. Desse modo, o modelo demonstrou elevada concordância entre os valores experimentais e estimados, sendo selecionado para representar a cinética de secagem da espuma de leitelho.

Além disso, a adequação do modelo de Page também foi observada em estudos com outras matrizes lácteas submetidas à secagem em leito de espuma. Kashaninejad et al. (2022), ao avaliarem a cinética de secagem de creme de leite de camelo em diferentes temperaturas, verificaram que o modelo de Page apresentou o melhor ajuste entre os 17 modelos matemáticos avaliados, com coeficientes de determinação superiores a 0,99 e menores valores de erro.

De forma semelhante, Dumpler e Moraru (2023), em estudos de secagem de leite desnatado concentrado, utilizaram o modelo de Page para descrever a cinética de secagem e obtiveram coeficientes de determinação ajustados superiores a 0,98, demonstrando a capacidade preditiva do modelo em representar a variação da umidade ao longo do tempo.

Assim, os resultados obtidos, associados aos trabalhos realizados com creme de leite e leite desnatado, indicam que o modelo de Page apresentou potencial para descrever a cinética

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de secagem de diferentes matrizes lácteas, sendo, no caso da espuma de leitelho, o modelo que apresentou melhor ajuste.

Tabela 3. Parâmetros obtidos dos modelos ajustados aos dados de secagem do leitelho nas temperaturas de 60 e 80 °C

Modelo	$T\ (°C)$	a	k	k_0	k_1	n	b
Aproximação da Difusão	60	-79,1938	2,8459	-	-	-	1,0054
	80	-41,8287	5,2428	-	-	-	1,0083
Dois Termos	60	0,5047	-	4,5234	4,5234	-	0,5047
	80	0,5003	-	7,6879	7,6879		0,5003
Page	60	-	10,8707	-	-	1,6418	-
	80	-	27,2855	-	-	1,9318	-
Thompson	60	-0,2346	-	-	-	-	-0,0046
	80	-0,2003	-	-	-	-	-0,0033

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Conforme apresentado na Tabela 3, os parâmetros dos modelos variaram em função da temperatura de secagem, evidenciando a influência do aquecimento sobre a remoção de água da espuma de leitelho. No modelo de Page, selecionado como o mais adequado, a constante de secagem k aumentou de 10,8707, a 60 °C, para 27,2855, a 80 °C. Nesse sentido, o maior valor de k na temperatura mais elevada indica maior velocidade de secagem, em concordância com a redução mais rápida da razão de umidade observada experimentalmente.

De maneira semelhante, o aumento da constante de secagem com a elevação da temperatura também foi observado em estudos com matrizes lácteas submetidas à secagem em leito de espuma. Baptestini et al. (2021), ao avaliarem a secagem de espuma de soro de leite em diferentes temperaturas, observaram maiores valores de coeficiente de difusão efetivo nas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

condições de maior temperatura, indicando que o aumento da temperatura favoreceu a movimentação da água no material.

Esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, no qual a constante de secagem apresentou valores superiores na temperatura de 80 °C em comparação a 60 °C. Assim, a maior constante de secagem observada na condição de maior temperatura indica uma maior velocidade de remoção de água da espuma de leitelho, evidenciando a influência das condições térmicas sobre a cinética do processo.

3.2. Difusividade efetiva e energia de ativação

Na Tabela 4 são apresentados os valores de difusividade efetiva determinados para a secagem da espuma de leitelho nas temperaturas de 60 e 80 °C.

Tabela 4. Valores de difusividade efetiva (D_{ef}) e energia de ativação (E_a) para a secagem do leitelho nas temperaturas de 60 e 80 °C

Temperatura (°C)	D_{ef} $(m^2 s^{-1})$	E_a $(kJ mol^{-1})$
60	$1{,}07\times10^{-5}$	111,22
80	$4{,}42\times10^{-5}$	122,07

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Conforme apresentado na Tabela 4, a difusividade efetiva aumentou com a elevação da temperatura. Comportamento semelhante foi observado por Baptestini et al. (2021), que verificaram o aumento da difusividade efetiva com a elevação da temperatura de secagem, contribuindo para a intensificação da transferência de massa.

3.3. Caracterização físico-química

Os valores médios de atividade de água, pH, umidade, cinzas, proteínas e lipídios da espuma de leitelho e dos pós obtidos após a secagem a 60 e 80 °C são apresentados na Tabela 5.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 5. Valores médios de composição físico-química da espuma de leitelho in natura e seca nas temperaturas de 60 e 80 °C

Composição	Espuma	Pó seco a 60 °C	Pó seco a 80 °C
Aw	0,99±0,00^{a}	0,66±0,03^{b}	0,62±0,01^{c}
pH	6,60±0,01^{a}	6,44±0,29^{a}	6,56±0,01^{a}
Umidade (%, b.u.)	96,23±0,08^{a}	9,61±0,22^{b}	8,58±0,12^{c}
Cinzas (%, b.s.)	0,18±0,00^{c}	5,28±0,04^{a}	5,13±0,05^{b}
Proteínas (%, b.s.)	0,97±0,01^{c}	32,83±0,49^{a}	30,03±0,63^{b}
Lipídios (%, b.s.)	1,50±0,11^{b}	31,50±1,26^{a}	31,64±3,51^{a}

Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p<0,05$). Valores expressos como média ± desvio padrão. b.u. = base úmida. b.s. = base seca.

Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

Conforme apresentado na Tabela 5, o processo de secagem promoveu redução significativa da atividade de água e do teor de umidade da espuma de leitelho, com os menores valores observados no produto obtido a 80 °C. A atividade de água foi reduzida de 0,99 na espuma para 0,66 e 0,62 nos pós secos a 60 e 80 °C, respectivamente. De maneira semelhante, o teor de umidade, expresso em base úmida, diminuiu de 96,23% na espuma para 9,61% e 8,58% após a secagem a 60 e 80 °C, respectivamente.

O pH, por sua vez, não apresentou diferença significativa entre a espuma e os pós, indicando que as condições de secagem empregadas não provocaram alterações expressivas na acidez do produto. Em contrapartida, foram observados aumentos significativos nos teores de cinzas, proteínas e lipídios após a secagem. Esse aumento está associado principalmente à remoção de água durante o processo, que promove a concentração dos componentes sólidos presentes na matéria-prima.

O teor de cinzas aumentou de 0,18% na espuma para 5,28% e 5,13% nos pós obtidos a 60 e 80 °C, respectivamente. Embora tenha sido observada diferença significativa entre as

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

temperaturas, a pequena variação entre os valores obtidos sugere que a temperatura de secagem exerceu pouca influência sobre esse componente, o que já era esperado.

Já para os valores de proteínas, notou-se o aumento do teor, da espuma (0,97%) para os pós secos a 60 °C (32,83%) e 80 °C (30,03%), com diferença significativa entre os pós. Os resultados encontrados podem estar relacionados à variabilidade experimental, incluindo possíveis diferenças na homogeneidade das amostras e na determinação analítica, uma vez que a secagem, por si só, não promove a formação de proteínas.

Quanto ao teor de lipídios, os valores determinados nos pós secos a 60 e 80 °C, de 31,50% e 31,64%, respectivamente, não apresentaram diferença significativa entre as temperaturas. A ausência de diferença significativa entre as temperaturas indica que, nas condições avaliadas, a temperatura não exerceu efeito expressivo sobre o teor de lipídios do produto. De modo geral, os resultados obtidos mostram-se próximos aos reportados por Sodini et al. (2006), que avaliaram diferentes tipos de leitelho e encontraram teores de proteína entre 27,8 e 33,1% em base seca para leitelhos provenientes de cremes. No entanto, para lipídios, os autores relataram valores entre 13 e 22% em base seca para os leitelhos produzidos em escala piloto, enquanto os pós obtidos neste estudo apresentaram teor de aproximadamente 31,5%, também em base seca. A diferença observada pode estar relacionada às características da matéria-prima e às condições empregadas no processamento, uma vez que a composição do leitelho pode variar conforme a origem do creme, as condições de fabricação da manteiga e a composição da formulação utilizada na obtenção da espuma.

Além disso, a presença do emulsificante na formulação também pode contribuir para diferenças na composição do produto final.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do desenvolvimento deste trabalho, foi possível avaliar o comportamento do leitelho durante a secagem em leito de espuma, em que os resultados demonstraram que o aumento da temperatura acelerou a remoção de água, sendo a secagem a 80 °C associada à menor razão de umidade, à maior difusividade efetiva e aos menores valores finais de atividade de água e umidade. Da mesma forma, entre os modelos matemáticos avaliados, o modelo de Page apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais nas duas temperaturas, com elevado coeficiente de determinação e reduzido desvio padrão da estimativa.

No que se refere à composição físico-química, o processo de secagem não promoveu alteração significativa no pH. Por outro lado, os teores de cinzas, proteínas e lipídios aumentaram

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

em comparação à espuma inicial, principalmente em decorrência da concentração dos sólidos após a retirada de água. Entre as condições avaliadas, o pó obtido a 60 °C apresentou maiores teores de cinzas e proteínas, enquanto os teores de lipídios não diferiram entre as temperaturas.

Dessa forma, conclui-se que a secagem em leito de espuma apresenta potencial para o aproveitamento do leitelho e sua transformação em um ingrediente em pó. Todavia, estudos adicionais são necessários para otimizar o processo, reduzir ainda mais a umidade e a atividade de água e avaliar a estabilidade, as propriedades funcionais e as possíveis aplicações do produto em formulações alimentícias.

REFERÊNCIAS

ASSIS, J. et al. Cadeia produtiva do leite no Brasil no contexto do comércio internacional. *Revista de Ciências Empresariais da UNIPAR*, v. 17, n. 1, 2016.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; ZEYMER, J. S.; LEITE, R. A.; BUSTOS-VANEGAS, J. D.; BAPTESTINI, G. C. F. Mathematical modeling of whey foam mat drying. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 68, n. 4, p. 293–300, 2021.

BASTOS, D. S.; SOARES, D. M. B. G.; ARAÚJO, K. G. L.; VERRUMA-BERNARDI, M. R. Desidratação da polpa de manga “Tommy Atkins” utilizando a técnica de foam-mat drying: avaliações químicas, físico-químicas e sensoriais. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 8, p. 283-290, 2005.

CARVALHO, G. R.; CICARINI, M. Análise da concentração e geografia da produção de leite no Brasil. *Revista Política Agrícola*, Brasília, v. 16, n. 2, p. 80-83, maio/jun. 2007.

DUMPLER, J.; MORARU, C. I. Modeling the drying kinetics of microwave vacuum drying of concentrated skim milk: correlation of dielectric properties, drying stages, and specific energy demand at pilot scale. *Drying Technology*, v. 41, n. 1, p. 17–33, 2023.

FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos*: princípios e prática. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. p. 601-602.

FU, N.; WOO, M. W.; SELOMULYA, C.; CHEN, X. D.; PATEL, K.; SCHUCK, P.; JEANTET, R. Drying kinetics of skim milk with 50 wt.% initial solids. *Journal of Food Engineering*, v. 109, n. 4, p. 701–711, 2012.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). *Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz*. 4. ed. São Paulo: IAL, 2008.

KASHANINEJAD, M.; RAZAVI, S. M. A.; SALAHI, M. R. Drying kinetics of camel milk cream foam using foam mat drying and study its effect on the structure and color of the product. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, v. 18, n. 1, p. 65–79, 2022.

LAMBERT, S. et al. The lipid content and microstructure of industrial whole buttermilk and butter serum affect the efficiency of skimming. *Food Research International*, v. 83, p. 121-130, 2016.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 940 p.

OLIVEIRA, C. C. et al. *Ciências Rurais no século XXI*: valorização e aplicação dos subprodutos do leite – soro do leite e leitelho. Belo Horizonte: Poisson, 2024.

PFRIMER, R. T. *Desenvolvimento e avaliação de bebida láctea fermentada acrescida de leitelho e saborizada com polpa de cagaita (Eugenia dysenterica)*. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola de Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

SODINI, I.; MORIN, P.; OLABI, A.; JIMÉNEZ, R. Compositional and Functional Properties of Buttermilk: A Comparison Between Sweet, Sour, and Whey Buttermilk. *Journal of Dairy Science*, v. 89, n. 2, p. 525–536, 2006.

SOUZA, A. et al. Potencial do uso do soro de leite de leitelho para a produção de derivados na Cidade de Nossa Senhora da Glória, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 10, n. 25, p. 1-12, jan. 2023.

VIMERCATI, W. C. et al. Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito de espuma e na degradação de antocianina em morango. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 22, 2019.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.