

Estudo tecnológico da obtenção de farinha desengordurada a partir do resíduo do extrato aquoso de gergelim (*Sesamum indicum* L.)

Technological study for obtaining defatted flour from the residue of the aqueous extract of sesame (*Sesamum indicum* L.)

DOI: 10.54033/cadpedv21n1-185

Recebimento dos originais: 29/12/2023

Aceitação para publicação: 31/01/2024

Mylena Olga Pessoa Melo

Mestre em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais

Instituição: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,

CEP: 58429-900

E-mail: mylenaopm@gmail.com

Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti-Mata

Doutor em Engenharia de Alimentos

Instituição: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,

CEP: 58429-900

E-mail: mcavalcantimata@gmail.com

Francisca Moises de Sousa

Mestre em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais

Instituição: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,

CEP: 58429-900

E-mail: fran_moyses@hotmail.com

Manoel Pessoa Ferreira Neto

Bacharel em Engenharia de Alimentos

Instituição: Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,

CEP: 58429-900

E-mail: manoelneto2000@hotmail.com

Manoel Tolentino Leite Filho

Doutor em Engenharia de Processos

Instituição: Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,
CEP: 58429-900

E-mail: manaelqi20091@gmail.com

Rebeca Moraes Silva Santos

Mestre em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais

Instituição: Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,
CEP: 58429-900

E-mail: rebecamoraiscg@gmail.com

Alexandre da Silva Lúcio

Bacharel em Engenharia de Alimentos

Instituição: Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: R. Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande – PB,
CEP: 58429-900

E-mail: alexandre01lucio@gmail.com

RESUMO

Considerando um aumento na busca por “dietas sustentáveis”, impulsiona o interesse em produtos à base de plantas, podendo-se destacar o gergelim devido aos seus benefícios nutricionais. Diante disso, este estudo propõe analisar a tecnologia aplicada ao desenvolvimento de uma farinha desengordurada a partir do resíduo do extrato aquoso de gergelim, verificando a influência de diferentes temperaturas nas características nutricionais do produto final. Além de abordar a transferência de calor e massa na secagem convectiva deste resíduo, introduzindo novos conceitos propostos por Cavalcanti-Mata (2020) a partir do modelo de Fick modificado. O resíduo foi submetido à secagem convectiva e aos dados experimentais foram aplicados modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos de secagem e posteriormente calculadas as propriedades termodinâmicas. O material foi caracterizado quanto as análises físico-químicas, antes e após a secagem. O modelo de Cavalcanti-Mata e Page modificados, apresentaram um ótimo ajuste aos dados experimentais. Os valores obtidos para os parâmetros termodinâmicos, destacam a diminuição da entalpia com o aumento da temperatura de secagem, comprovando a necessidade de menos energia para a remoção de água ligada ao produto. Foram obtidas farinhas com baixo teor lipídico e ricas em proteínas, com potencial aplicação na indústria alimentícia, atendendo a demanda dos consumidores intolerantes e/ou alérgicos a glúten.

Palavras-chave: difusividade efetiva, aproveitamento de resíduos, tecnologia de alimentos.

ABSTRACT

Considering a growing interest in "sustainable diets," there is a surge in demand for plant-based products, with sesame being noteworthy for its nutritional benefits. In light of this, this study aims to examine the technology applied to the development of a defatted flour from the residue of sesame aqueous extract, assessing the influence of different temperatures on the nutritional characteristics of the final product. In addition to addressing heat and mass transfer in the convective drying of this residue, it introduces new concepts proposed by Cavalcanti-Mata (2020) based on the modified Fick model. The residue underwent convective drying, and theoretical, semi-theoretical, and empirical drying models were applied to the experimental data, followed by the calculation of thermodynamic properties. The material was characterized through physical-chemical analyses before and after drying. The modified Cavalcanti-Mata and Page models showed an excellent fit to the experimental data. The obtained values for thermodynamic parameters highlight a decrease in enthalpy with an increase in drying temperature, confirming the reduced energy requirement for removing bound water from the product. Defatted flours, low in lipids and rich in proteins, were obtained, with potential applications in the food industry, meeting the demands of consumers intolerant and/or allergic to gluten.

Keywords: effective diffusivity, waste utilization, food technology.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por "dietas sustentáveis" tem impulsionado uma transformação global, promovida pelo aumento populacional e pela busca por fontes de alimentos nutritivos e ecologicamente sustentáveis. Nesse cenário, os produtos alimentares à base de plantas emergem como uma opção acessível para os consumidores. Essa mudança é motivada por fatores como a alteração nos estilos de vida, aumento da conscientização dos consumidores sobre a produção sustentável de alimentos, o interesse em dietas alternativas e a busca por opções por parte de indivíduos intolerantes e/ou alérgicos a alimentos como leite e glúten (Jeske et al., 2018).

Dentre as oleaginosas existentes, o grão de gergelim se destaca por apresentar índices elevados de óleo (46%-50%) com 83%-90% de ácidos graxos saturados, 20% de proteínas e micronutrientes como as vitaminas e minerais, além de grande quantidade de lignanas (compostos de metilenedioxifenil), tais

como extratos vegetais, sesamol, sesamolin e tocoferóis. Os componentes funcionais atuam em conjunto no organismo, promovendo a redução de processos oxidativos e fornecendo propriedades nutracêuticas (Cruz et al., 2019).

Segundo Silva et al. (2018) a obtenção do extrato de gergelim a partir do resíduo proveniente da extração de óleo de gergelim, também resulta em um resíduo com potencial nutricional passível de aproveitamento. Sendo assim faz-se necessário a aplicação de técnicas de conservação com o objetivo de aumentar sua vida de prateleira para a criação de novos produtos, provenientes dos resíduos desses sistemas agroindustriais e para que esse novo produto tenha um tempo de prateleira significativo e a conservação de suas propriedades nutracêuticas seja obtida, também é necessário a utilização de processos que propiciem que essas características sejam alcançadas (Melo et al, 2021).

Uma opção viável é a produção de farinhas alimentícias por meio do processo de secagem, uma vez que esses resíduos processados representam um potencial socioeconômico e alimentício, constituindo-se numa alternativa ao incremento da renda familiar a pequenos e micro indústrias, contribuindo para a sustentabilidade, geração de emprego e renda (Sousa et al., 2020a; Sousa et al., 2020b).

O processo de secagem visa mitigar questões ambientais, ao mesmo tempo em que possibilita a obtenção de um produto com valor agregado e diversas aplicações comerciais. Esse processo envolve a redução do teor de água do produto a um nível seguro, proporcionando a preservação da qualidade fisiológica e físico-química do material a ser armazenado por um período prolongado (Santos et al., 2020; Albuquerque Junior, 2022).

Estudos têm sido feitos visando empregar a farinha de gergelim ou farinha do resíduo de gergelim na substituição parcial da farinha de trigo em produtos alimentícios, mas poucas pesquisas tem se dedicado a estudar sobre a cinética de secagem do resíduo do gergelim ou do extrato aquoso do gergelim, visando compreender a influência de diferentes temperaturas nas características nutricionais do produto final.

Silva et al. (2020) estudaram a influência da incorporação da farinha de resíduo proveniente da extração de óleo de gergelim na qualidade de pães, para a obtenção da farinha, realizaram a secagem a 50 °C por 5 horas e afirmam que sua utilização na formulação de produtos alimentícios, como pães, bolos, biscoitos, é uma excelente alternativa na substituição parcial da farinha de trigo, considerando suas potencialidades nutricionais. Em outro estudo Silva et al. (2023) avaliaram a aceitabilidade de biscoitos salgados enriquecidos com diferentes concentrações de farinha elaborada a partir do resíduo proveniente da extração de óleo de gergelim (FRG). Os resultados, indicaram que os biscoitos com 5% de FRG apresentaram médias de aceitabilidade superiores às demais, sugerindo que essa concentração é uma alternativa viável para o enriquecimento de alimentos.

Considerando a escassez de pesquisas voltadas ao estudo da cinética de secagem de resíduo do extrato aquoso de gergelim, o presente estudo tem como objetivo estudar a tecnologia aplicada no desenvolvimento de uma farinha desengordurada, a partir do resíduo do extrato aquoso de gergelim, verificando a influência de diferentes temperaturas nas características nutricionais do produto final. Além de abordar a transferência de calor e massa na secagem convectiva deste resíduo, introduzindo novos conceitos propostos por Cavalcanti-Mata (2020) a partir do modelo de Fick modificado, dando novo significado as equações propostas por Page, Lewis e Cavalcanti Mata, bem como determinar a difusividade efetiva, energia de ativação do produto e as propriedades termodinâmicas (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi efetuada no laboratório de Secagem e de Análises Químicas do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba (PB), Brasil.

2.1 OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Foram utilizados grãos de gergelim de cultivar BRS Seda, adquiridos no mercado local da cidade de Campina Grande – PB, os quais foram selecionados,

higienizados e despelculados. Para a obtenção do resíduo do extrato aquoso de gergelim, seguiu-se a metodologia desenvolvida por Melo et al. (2021), ao estudar a obtenção do extrato de gergelim a partir da torta resultante da extração de óleo de gergelim. De modo que os grãos após a despelculagem, foram encaminhados para prensagem em um prensa hidráulica manual, a partir da torta resultante dessa prensagem, foi produzido o extrato aquoso de gergelim na concentração (torta:água) de 1:6 e a partir desta etapa obteve-se o resíduo do extrato aquoso de gergelim.

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

A matéria-prima e as farinhas obtidas após secagem foram avaliadas segundo o método AOAC (2005), em relação ao teor de água, pH, acidez titulável, sólidos solúveis totais e relação SST/AT. O teor de lipídios foi obtido de acordo com o método Bligh e Dyer (1959). A análise de cinzas, foi empregue o método AOAC (2002). Os açúcares totais, redutores e não-redutores foram determinados pelo método de Miller (1959). E o teor de proteínas foi quantificado pelo método de Bradford (1976).

2.3 SECAGEM DO RESÍDUO E MONITORAMENTO CINÉTICO

O resíduo do extrato aquoso do gergelim foi disposto em bandejas teladas de aço inoxidável (formando uma camada de 1 cm de espessura) e encaminhadas a secagem em estufa com circulação de ar forçado, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C. Para estudo da cinética de secagem, a redução do teor de água foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de água), conhecendo-se o teor de água inicial do produto até atingir o equilíbrio higroscópico. O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi realizado com auxílio de uma balança semi-analítica com precisão de 0,01g, de modo que as bandejas foram retiradas da estufa em intervalos de tempo diferentes e pesadas em balança analítica. Depois da secagem 5 gramas do produto foi colocado em uma estufa à temperatura de 105 °C (± 1 °C), por um período de 24h, com a finalidade de determinar o teor de água do produto ao final de cada prática experimental (Brasil, 1992).

2.4 CÁLCULO DA RAZÃO DO TEOR DE ÁGUA

Os dados experimentais da perda de água ao longo do processo de secagem foram expressos como razão de umidade (X^*), conforme apresentado na Equação 1:

$$RX = \frac{X_{bs} - X_e}{X_{bs\text{ inicial}} - X_e} \quad (1)$$

Onde: RX , razão de teor de água (adimensional); X_e , teor de água de equilíbrio, decimal (base seca); X_{bs} , teor de água, decimal (base seca); $X_{bs\text{ inicial}}$, teor de água inicial, decimal (base seca).

2.5 MODELOS MATEMÁTICOS

Para prever a cinética de secagem do presente estudo foram aplicados aos dados experimentais os modelos matemáticos cujas equações correspondentes estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos aplicados aos dados experimentais para prever a cinética de secagem.

Modelo Teórico	Equação
Fick	$RX = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \cdot \frac{\pi^2 D_s}{4L^2} \cdot t \right] \quad (2)$
Modelo semiteórico	Equação
Cavalcanti-Mata modificada	$RX = a_1 \cdot \exp \left(-\frac{\pi^2 D_s}{4L^2} \cdot t^{N_1} \right) + a_2 \cdot \exp \left(-\frac{9 \cdot \pi^2 \cdot D_s}{4L^2} \cdot t^{N_2} \right) \quad (3)$
Modelo semiempírico	Equação
Lewis modificada	$RX = \exp(-k_s \cdot t^n) \quad (4)$
Page modificada	$RX = \exp \left(-\frac{\pi^2 D_s}{4L^2} \cdot t^n \right) \quad (5)$
Modelo empírico	Equação
Midilli et al.	$RX = a \cdot \exp(-k_s \cdot t^n) + b \cdot t \quad (6)$

t = tempo em minutos; a_1 , a_2 , a_3 , a , b e n são constantes do modelo.

Fonte: Autores (2024).

2.6 ENERGIA DE ATIVAÇÃO (EA)

A energia de ativação foi determinada utilizando-se equação do tipo Arrhenius (Equação 7) onde a difusividade efetiva tem uma interdependência com a temperatura, sendo que esta equação pode ser linearizada e expressa pela Equação 8 (Horn et al., 2010).

$$D_{ef} = D_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_a}\right) \quad (7)$$

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_o) - \left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T_a} \quad (8)$$

Em que: D_{ef} , difusividade efetiva, $m^2 s^{-1}$; D_o , constante chamada de fator pré-exponencial, $m^2 s^{-1}$; E_a , energia de ativação, $kJ mol^{-1}$; R , constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$; T_a , temperatura absoluta, K.

2.7 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

O cálculo das propriedades termodinâmicas do resíduo do extrato aquoso de gergelim: entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, foi realizado a partir da determinação da energia de ativação, de modo que esses três parâmetros são determinados segundo a teoria de Jideani e Mpotokwana (2009), seguindo respectivamente, as Equações 9, 10 e 11:

$$\Delta H = E_a - R T \quad (9)$$

$$\Delta S = R \left[\ln D_o - \ln\left(\frac{k_b}{k_p}\right) - \ln T \right] \quad (10)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (11)$$

Onde: ΔH , entalpia, $J mol^{-1}$; ΔS , entropia, $J mol^{-1} K^{-1}$; ΔG , energia livre Gibbs, $J mol^{-1}$; k_b , constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J K^{-1}$; h_p , constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} J s^{-1}$.

2.8 ANÁLISES ESTATÍSTICA

Por meio da análise de regressão não linear utilizando-se o software Statistica 8.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) foram determinados o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2), erro médio relativo (P), o desvio padrão da estimativa (SE) e o desvio quadrático médio (DQM), utilizando as equações (12), (13), (14) e (15), respectivamente. Assim,

esses parâmetros foram considerados como critérios de seleção na obtenção do modelo apresenta maior ajuste os dados experimentais.

$$R_a^2 = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{(n-1)-p} \quad (12)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y-\hat{Y}}{Y} \right) \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y-\hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{exp} - RX_{pre})^2}{N}} \quad (15)$$

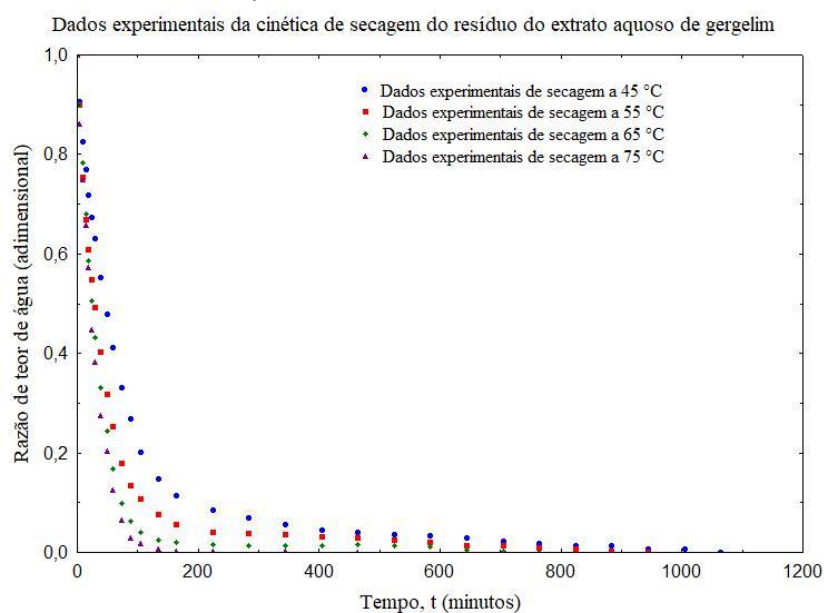
Em que: R_a^2 , coeficiente de determinação ajustado; p , número de coeficientes da equação; n , número de observações ao longo do experimento; P , erro médio relativo; Y , valor observado experimentalmente; \hat{Y} , valor calculado pelo modelo; SE , erro padrão estimado; GLR , grau de liberdade do modelo; DQM , desvio quadrático médio; RX_{exp} , razão do teor de água obtida experimentalmente; RX_{pre} , razão do teor de água predita pelo modelo matemático; N , número de observações ao longo do experimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CINÉTICA DE SECAGEM

Na Figura 2 estão os dados experimentais da secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim em camada espessa, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C.

Figura 1: Dados experimentais da secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C.



Fonte: Autores (2024).

Park et al. (2014) afirmam que estas curvas expõem a redução do teor de água do produto durante o decorrer do tempo (t) de secagem, ou seja, tratam-se das curvas obtidas pela perda de massa do produto durante o processo para uma determinada condição de secagem.

A elevação da temperatura do ar de secagem resulta numa extração de água mais rápida, ocasionando a diminuição do tempo de secagem. Após transcorrido um período de secagem, o processo passa a acontecer de forma mais lenta, atestando resistência para a retirada de água do material até atingir o equilíbrio entre o teor de água do produto, a temperatura de secagem e a umidade relativa do ar, o que chamamos de equilíbrio higroscópico.

Ao observar a Figura 2, é possível visualizar os tempos médios de secagem necessários para que o resíduo do extrato aquoso do gergelim atinja seu equilíbrio higroscópico, os quais foram 585, 465, 405, 345 minutos, para as temperaturas de 4, 55, 65 e 75 °C, respectivamente. Santos et al. (2019) atesta que esse comportamento dá-se pelo fato de que altas temperaturas de secagem culminam em uma maior taxa de remoção de água do produto, reduzindo o tempo de secagem.

Na figura 3 estão expressas as curvas de secagens obtidas através do ajuste do modelo de Fick com seis termos na série, aos dados experimentais obtidos nas cinéticas de secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C e na Tabela 2 estão os valores obtidos para difusividade efetiva também através da equação de Fick com 6 termos na série.

Figura 2: Dados experimentais e calculados da secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, utilizando-se o Modelo de Fick com 6 termos da série.

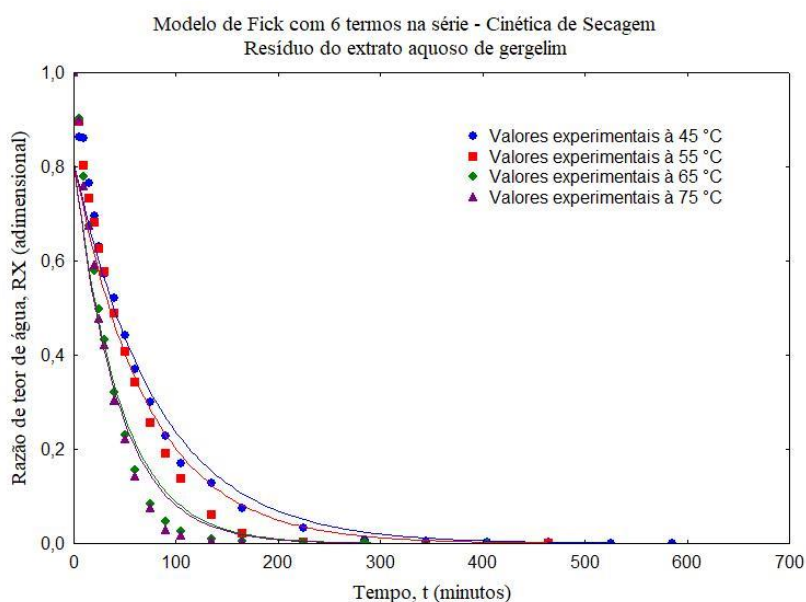


Tabela 2: Parâmetros da cinética de secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim por meio do modelo de Fick com 6 termos na série, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), coeficientes de determinação ajustado (R^2_a) para as quatro temperaturas (45, 55, 65 e 75 °C).

Fick com 6 termos na série			
Temperatura	Def ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	R^2 (%)	R^2_a (%)
45 °C	2,317	96,32	96,14
55 °C	2,618	94,66	94,36
65 °C	4,166	92,24	91,78
75 °C	4,325	94,17	93,80

Fonte: Autores (2024).

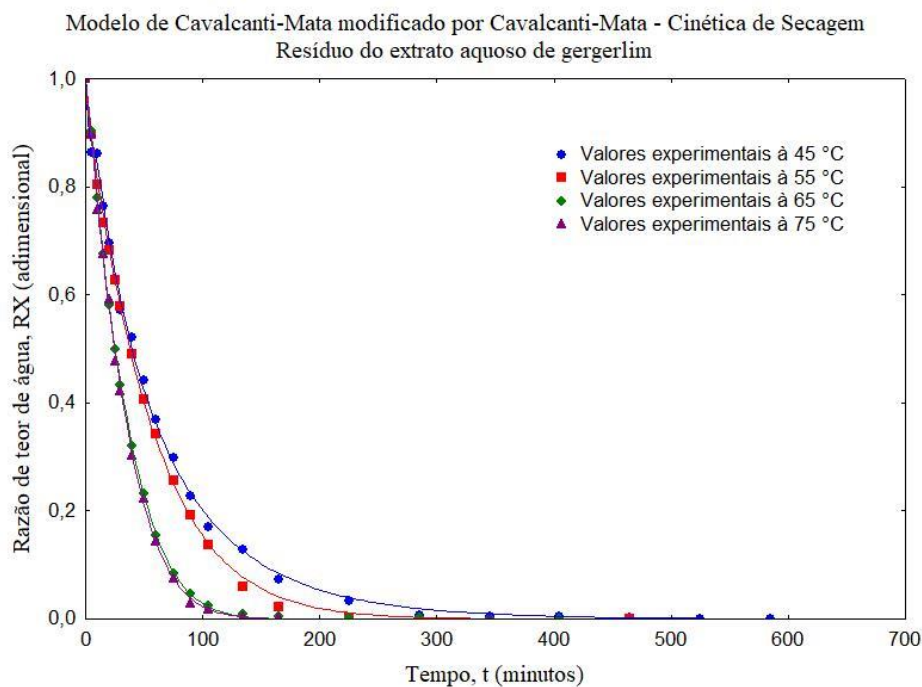
Verifica-se na Tabela 2 que os valores de difusividade efetiva variaram entre $2,317 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $4,325 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, aumentando de forma diretamente

proporcional ao aumento da temperatura de secagem, de modo que quanto maior o valor da difusividade efetiva maior a velocidade de remoção das moléculas de água do material.

Comportamento semelhante foi identificado por Albuquerque Júnior (2022) ao estudar a cinética de secagem do resíduo agroindustrial da acerola verde, porém obteve magnetudes superiores ao do presente estudo, com valores variando de $6,58 \times 10^{-10}$ e $1,58 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de temperatura de 50 e 70 °C, apresentando ajustes satisfatórios com R^2 superiores a 95,68%, valores também superiores aos obtidos na pesquisa em questão, onde foram obtidos ajustes com R^2 variando entre 92,24% e 96,32% e R_a^2 entre 91,78% e 96,14%.

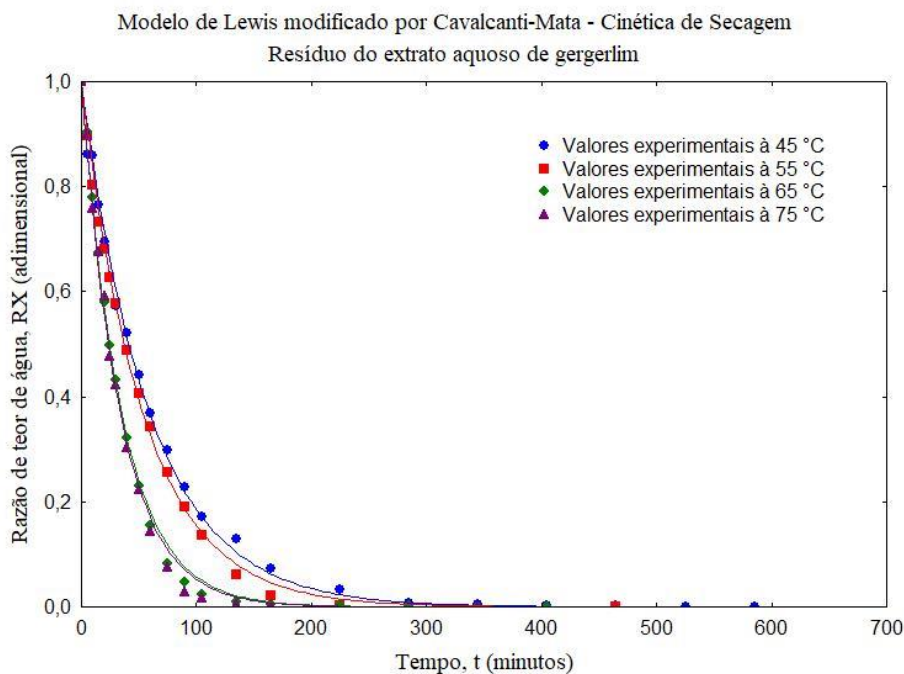
Nas Figuras 4, 5, e 6 encontram-se os dados experimentais da cinética de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim e os valores calculados pelo Modelo de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti-Mata, Modelo de Lewis modificado por Cavalcanti-Mata e pelo Modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata, respectivamente, para as temperaturas de secagem de 45, 55, 65 e 75 °C.

Figura 3: Dados experimentais e calculados da secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, utilizando-se o Modelo de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti-Mata.



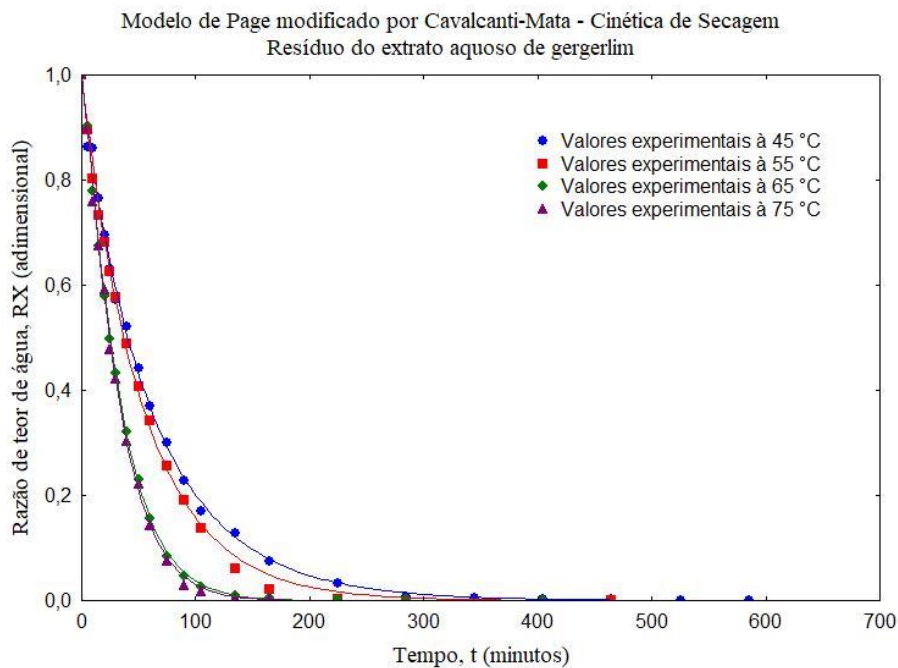
Fonte: Autores (2024).

Figura 4: Dados experimentais e calculados da secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, utilizando-se o Modelo de Lewis modificado por Cavalcanti-Mata.



Fonte: Autores (2024).

Figura 5: Dados experimentais e calculados da secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, utilizando-se o Modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata.



Fonte: Autores (2024).

Os resultados presentes nas Figuras 4, 5 e 6 mostram que com o aumento da temperatura acarreta a diminuição no tempo de secagem, com isso, influencia o aumento da taxa de perda de água, principalmente no início do processo. Segundo Ribeiro et al. (2019) isso ocorre porque a elevação da temperatura do ar de secagem desenvolve maior gradiente de umidade entre o produto e o ar, ocasionando maior taxa de remoção de água, independentemente do tipo do material utilizado.

Na Tabela 3 encontram-se, os parâmetros obtidos a partir das equações dos referidos modelos bem como os valores estatísticos que são os coeficientes de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_a), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e o desvio quadrático médio (DQM).

Tabela 3: Parâmetros estimados dos modelos de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti Mata, Modelo de Lewis modificado por Cavalcanti Mata e pelo Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata, obtidos por meio de regressão não linear para secagem do resíduo do extrato aquoso de gelim nas temperaturas de 45, 5, 65 e 75 °C.

Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti-Mata										
Temperatura	a_1	Def ($10^{-11}m^2s^{-1}$)	n_1	a_2	n_2	R^2 (%)	R^2_a (%)	P (%)	SE	DQM
45 °C	0,1058	6,421	1,2226	1,0955	0,8282	99,94	99,91	0,012	0,034	0,0063
55 °C	0,5893	6,891	1,4672	0,4005	0,8320	99,96	99,94	0,036	0,007	0,0076
65 °C	0,7435	9,4833	1,4672	0,2566	1,3223	99,99	99,98	0,002	0,030	0,0033
75 °C	0,8166	9,8062	2,7963	0,1834	1,3647	99,97	99,95	0,27	0,009	0,0097
Lewis modificado por Cavalcanti-Mata										
Temperatura	Def ($10^{-11} m^2 s^{-1}$)				R^2 (%)	R^2_a (%)	P (%)	SE	DQM	
45 °C	2,481				99,70	99,66	0,024	0,065	0,0070	
55 °C	3,151				95,70	95,19	0,050	0,081	0,0017	
65 °C	4,833				96,46	95,76	0,089	0,089	0,0016	
75 °C	4,996				99,56	99,50	0,010	0,088	0,0015	
Page modificado por Cavalcanti-Mata										
Temperatura	Def ($10^{-11} m^2 s^{-1}$)		n		R^2 (%)	R^2_a (%)	P (%)	SE	DQM	
45 °C	3,009		0,9275		99,91	99,90	0,017	0,077	0,0053	
55 °C	3,049		0,9852		99,92	99,91	0,075	0,073	0,0016	
65 °C	3,338		1,1311		99,84	99,82	0,040	0,091	0,0001	
75 °C	3,785		1,1452		99,91	99,89	0,067	0,090	0,0013	

Nota: a_1 , a_2 , n, n_1 , n_2 , constantes do modelo; R^2 , coeficientes de determinação; R^2_a coeficiente de determinação ajustado; P, erro médio relativo; SE, erro médio estimado; DQM, desvio quadrático médio.

Fonte: Autores (2024).

Analisando os dados descritos na Tabela 3 é possível verificar que os valores de difusividade efetiva (Def) para o modelo de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti Mata, modelo de Lewis modificado por Cavalcanti Mata e o modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata, apresenta uma variação direta em função do aumento da temperatura, de modo que os maiores valores foram encontrados a partir da equação de Cavalcanti-Mata modificada por Cavalcanti-Mata, variando de $6,421 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $9,8062 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 45 e 75 °C, respectivamente. E os menores valores de difusividade efetiva, $3,009 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $3,785 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, foram obtidos para o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata.

Estudando os demais parâmetros obtidos a partir da aplicação dos modelos aos dados de secagem, nota-se que os valores apresentam relação com o aumento da temperatura, de modo que para o modelo de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti-Mata os valores de n_1 decrescem com o aumento da temperatura do ar de secagem e os valores de a_2 e n_2 crescem proporcionalmente ao aumento da temperatura, assim como também os valores de n para o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata, que atingem valores maiores conforme o aumento da temperatura, porém mantendo um padrão, apresentando valores bem próximos. De acordo com Mendonça et al. (2015), o parâmetro “n” da equação de Page, possui um efeito de moderação no tempo de secagem, corrigindo os prováveis erros de negligência da resistência interna ao transporte de água.

De acordo com Moscon et al. (2017) considera-se que o modelo obteve um bom ajuste aos dados, quando os valores de R^2 e R^2_a estão próximos a 1, tendo em vista que esse coeficiente de determinação varia entre 0 e 1, quanto mais próximo a unidade, indica proximidade entre os dados obtidos e os estimados. Os valores de R^2 e R^2_a também podem ser representados em porcentagem, dessa forma valores entre 98% e 99% podem ser tidos como indicadores de um ótimo ajuste do modelo matemático aos dados de secagem.

Na Tabela 3, estão representados valores para o coeficiente de determinação ajustado (R^2_a) superiores a 99,82%, para os modelos de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti-Mata e Page modificado por

Cavalcanti-Mata, indicando que ambos apresentaram ajuste satisfatório para descrever o processo de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, diferentemente do modelo de Lewis modificado por Cavalcanti-Mata, que apresentou valores de R^2_a iguais a 95,19% e 95,76% para resíduo seco sob as temperaturas de 55 e 65 °C, respectivamente.

Segundo Corrêa et al. (2010) em processos de secagem, o coeficiente de determinação (R^2) para modelos não lineares não é uma boa ferramenta de tomada de decisão, sendo necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos. Desta forma, utiliza-se os valores do erro médio relativo (P) e erro médio estimado (SE) (Madamba, et al., 1996). Nestes casos Martins et al. (2014) afirma que os dados de DQM também podem ser considerados como critérios complementares de avaliação.

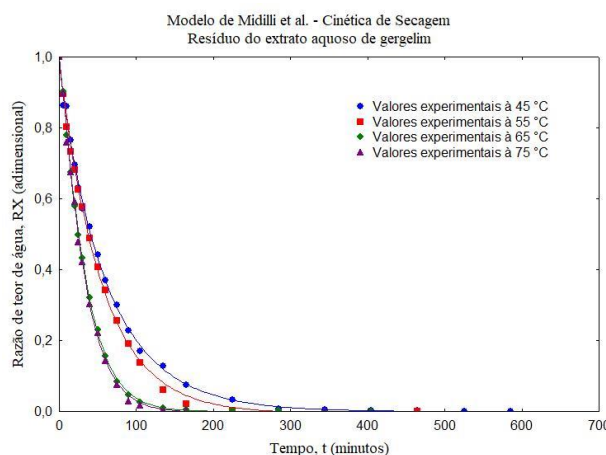
Na Tabela 3 constata-se que todos os modelos apresentaram baixos valores do erro médio estimado (SE) e do erro médio relativo (P). Segundo Mohapatra & Rao (2005), a magnitude desse erro relativo (P) deve ser inferior a 10%, sinalizando que esta equação descreve melhor o processo de secagem do que uma outra.

Em concordância com Botelho et al. (2018), o uso do erro médio estimado (SE) é interessante por medir o erro cometido pelo modelo na mesma unidade física da variável estimada. No presente trabalho, verificou-se que todos os Modelos derivados da 2ª Lei de Fick atingem um alto grau de ajuste com valores de DQM, iguais ou menores do que 0,0097, porém verifica-se que ao comparar as combinações dos coeficientes de determinação (R^2 e R^2_a) com os valores de erro médio estimado (SE) e do erro médio relativo (P) e DQM os resultados mostram que este o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata foi o mais representativo para a secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, seguido do modelo de Cavalcanti-Mata modificado por Cavalcanti-Mata.

Na Figura 7 encontram-se as curvas de secagem referentes ao modelo matemático de Midilli e seus colaboradores, ajustados à cinética de secagem do extrato aquoso de gergelim nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C, e na Tabela 4 constam os valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2),

coeficiente de determinação ajustado (R^2_a), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e o desvio quadrático médio (DQM).

Figura 6: Dados experimentais e calculados da secagem convectiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, utilizando-se o Modelo Midilli et al.



Fonte: Autores (2024).

Tabela 4: Parâmetros estimados do modelo de Midilli et al., obtidos por meio de regressão não linear para secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C.

Midilli et al.									
Temperatura	a_1	k	n	b	R^2 (%)	R^2_a (%)	P (%)	SE	DQM
45 °C	0,9818	0,0173	0,9439	-0,00001	99,82	99,80	0,016	0,015	0,0004
55 °C	0,9898	0,0174	1,0112	-0,00001	99,87	99,85	0,024	0,002	0,0005
65 °C	0,9965	0,0181	0,0181	-0,00001	99,97	99,96	0,042	0,026	0,0009
75 °C	1,0011	0,0207	0,0174	-0,00001	99,91	99,89	0,005	0,007	0,0004

Nota: a_1 , k, b e n, constantes do modelo; R^2 , coeficientes de determinação; R^2_a coeficiente de determinação ajustado; P, erro médio relativo; SE, erro médio estimado; DQM, desvio quadrático médio.

Fonte: Autores (2024).

Observando os parâmetros referentes ao ajuste do modelo de Midilli et al. verifica-se que a_1 apresenta uma pequena variação padrão de acordo com o aumento de temperatura, enquanto o valor de “n” não apresenta relação com a temperatura, segundo Perez et al. (2013), a constante ‘n’ no modelo de Midilli et al., está relacionada com a resistência do material de secagem. No entanto, para a constante “k” que representa a velocidade da difusão da água do material, observou-se que foi diretamente proporcional à elevação da temperatura do ar de secagem.

Em relação aos valores de R^2 e R^2_a , SE, P e DQM, o modelo de Midilli e colaboradores consegue descrever muito bem a curva de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim. Contudo, Corrêa et al. (2017), afirma que a desvantagem do Modelo de Midilli et al., é que por se tratar de um Modelo empírico e não permite determinar a difusividade de massa efetiva, sendo substituído por um valor de “k” que representa uma constante de secagem.

3.2 ENERGIA DE ATIVAÇÃO, ENTALPIA (ΔH), ENTROPIA (ΔS) E ENERGIA LIVRE DE GIBBS (ΔG)

A compatibilidade do coeficiente de difusividade efetiva do resíduo do extrato aquoso de gergelim com relação à temperatura do ar de secagem foi excelentemente retratada pela expressão de Arrhenius. Portanto, através da referida expressão foram plotados os valores do logaritmo neperiano dos coeficientes da difusividade efetiva [$\ln(D_{ef})$] em função do inverso da temperatura absoluta, adquirindo-se, conseqüentemente, o coeficiente angular de cada reta que corresponde à relação E/R , para cada faixa de temperatura conforme ilustrado na Figura 8. Sendo assim, ao multiplicar-se o valor do coeficiente angular da reta por 8,314 obtém-se o valor da energia de ativação para cada faixa de temperatura.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores da energia de ativação do resíduo do extrato aquoso de gergelim para cada modelo analisado.

Tabela 5: Valores referentes a energia de ativação da secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, para diferentes modelos matemáticos nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C.

Modelos	Energia de ativação (kJ mol ⁻¹)
Fick com 6 termos na série	20,67
Cavalcanti-Mata modificado	13,61
Page modificado	12,68
Lewis modificado	18,90

Fonte: Autores (2024).

Como pode ser observado na Tabela 5, a energia de ativação para difusão líquida do resíduo do extrato aquoso de gergelim apresentou valores de 20,67 kJ mol⁻¹ para o modelo Fick, 13,61 kJ mol⁻¹ para o modelo de Cavalcanti-Mata modificado por de Cavalcanti-Mata, 12,68 kJ mol⁻¹ para o modelo Page

modificado por Cavalcanti-Mata e 18,90 kJ mol⁻¹ para o modelo de Lewis modificado por Cavalcanti Mata. Valores inferiores ao encontrado por Albuquerque Junior (2022) ao estudar a cinética do resíduo agroindustrial de acerola verde, obtendo um valor de 47,7382 (kJ.mol⁻¹) para energia de ativação calculada a partir da equação de Fick. Conforme Resende et al. (2010) e Matin et al. (2017), termodinamicamente nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a velocidade com que a água será removida dos grãos.

A diferença entre os valores de energia de ativação, empregando a mesma faixa de temperatura, pode dá-se pela diferença na composição das amostras (Jorge et al., 2021). Assim, os valores encontrados nesta pesquisa encontram-se dentro do mencionado por Zogzas et al. (1996) o qual afirma que para os produtos agrícolas a energia de ativação deve estar entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹. Contudo, as diferenças para os valores nas energias de ativação devem-se principalmente a diversidade dos constituintes químicos de cada produto, bem como a sua estrutura física que pode ser diversa também em função de sua variedade.

As propriedades termodinâmicas, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs encontradas no processo de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim para os modelos estudados em diferentes temperaturas, estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades termodinâmicas da cinética de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, para diferentes modelos matemáticos nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C.

Modelos	T	Entalpia (ΔH)	Entropia (ΔS)	Energia Livre de Gibbs (ΔG)
	°C	J mol ⁻¹	J mol ⁻¹ K ⁻¹	J mol ⁻¹
Fick	45	18026,36	-154,3395703	67106,34772
	55	17943,22	-154,5969903	68651,03716
	65	17860,08	-154,8466787	70198,26176
	75	17776,94	-155,0890865	71747,94647
Page	45	4864,913	-162,417461	56513,66
	55	4781,773	-162,6748809	58139,13
	65	4698,633	-162,9245694	59767,13
	75	4615,493	-163,1669772	61397,60
Cavalcanti-Mata	45	10965,36	-168,0551447	64406,90058
	55	10882,22	-168,3125647	66088,74576
	65	10799,08	-168,5622531	67773,1261
	75	10715,94	-168,804661	69459,96656

	45	16259,98	-154,3395703	65339,95874
Lewis	55	16176,84	-154,5969903	66884,64818
	65	16093,7	-154,8466787	68431,87277
	75	16010,56	-155,0890865	69981,55749

Fonte: Autores (2024).

A compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo é fundamental na otimização e desenvolvimento de equipamentos, uma vez que, a relação usual da difusividade com a equação de Arrhenius, não se mostra satisfatória em diversos materiais (Touil et al., 2014). Sendo assim, a análise termodinâmica fornece uma compreensão abrangente da cinética térmica durante o processo de secagem (Sarpong et al., 2019).

Ao analisar a Tabela 6, observa-se que ocorre a diminuição da entalpia (ΔH) com o aumento da temperatura do ar de secagem para todos os modelos analisados. Em concordância com Sousa (2017) esse comportamento está interligado ao aumento da pressão parcial de vapor de água no material com o aumento da temperatura, desta forma, ocorre o aumento da velocidade de difusão da água do interior para a superfície do grão, ocorrendo perda da água do produto por dessorção. Assim, este estudo correspondeu as expectativas, pois apresentou menores valores de entalpia em temperaturas de secagem mais elevadas, indicando que menos energia é necessária para remover a água ligada ao produto durante a secagem em temperaturas mais altas.

Os valores de entropia (ΔS), os quais quantificam a mudança desordenada de moléculas em um sistema, foram negativos para o presente estudo. Segundo Rashid et al. (2023), valores negativos de entropia indicam que o estado de transição tem um grau de liberdade estrutural menor do que os reagentes. Além de que, as temperaturas mais elevadas podem aumentar o valor absoluto de entropia, o que torna o equilíbrio termodinâmico do material diferente do sistema original. A redução do valor absoluto de entropia foi observada mediante o aumento da temperatura de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, onde este comportamento pode estar relacionado à organização das moléculas devido à interação do sistema, água e produto.

A energia livre de Gibbs (ΔG) aumentou com a elevação da temperatura, apresentando valores positivos para toda faixa de temperatura estudada,

indicando que a secagem nas condições atuais do estudo não foram espontâneas. De modo que, segundo Santos et al. (2020a) valores positivos revelam que o processo de secagem envolve uma reação endergônica que requer calor do meio para que ocorra, ou seja, necessita de uma fonte de energia para disponibilizar os locais de sorção.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Na Tabela 7 estão expostos os valores médios dos parâmetros físico-químicos obtidos a partir da secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 75 °C.

Tabela 6: Valores médios dos parâmetros físico-químicos das farinhas obtidas a partir da secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim, sob as temperaturas de 45, 55, 65 75 °C.

Temperatura de secagem (°C)	Teor de água (%)	pH	Acidez Titulável Total (% ac/100g)	Cinzas (%)	Lipídios (%)	Proteínas (%)
<i>In natura</i>	33,43 b	6.04 a	0,67 a	3,76 a	37.08 b	20.35 b
45	2,94 a	5.87 b	0,68 a	2,37 b	35.08 a	20.29 b
55	2,71 a	5.56 c	0,68 a	2,43 b	35.32 a	20.19 a
65	2,52 a	5.36 d	0,59 b	2.39 b	35.62 a	19.64 a
75	2,14 a	5.04 e	0,58 b	2.63 b	35.01 a	19.35 a

Onde letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey para as linhas e letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey para as colunas.

Fonte: Autores (2024).

Analisando a Tabela 7, é visto que o teor de água encontrado nas farinhas elaboradas a partir do resíduo do extrato aquoso de gergelim oscilou entre 2,94% para a farinha seca a 45 °C e 2,14% para a farinha seca a 75 °C, indicando uma relação inversamente proporcional ao aumento da temperatura, mesmo não apresentaram diferença significativa entre si pelo teste de Tukey. O presente estudo apresentou valor de teor de água bem próximo ao encontrado por Silva et al. 2018, ao secar também resíduo do extrato aquoso de gergelim a uma temperatura de 65 °C, porém os valores são inferiores ao obtido por Sá et al. (2022), os quais alcançaram um valor 4,7% de teor de água, avaliando a farinha de gergelim proveniente no resíduo da prensagem a frio de gergelim, diferença

esperada já que o material estudado por Sá et al. (2022) trata-se de uma farinha crua, diferente do presente estudo e da pesquisa de Silva et al. (2018).

O potencial hidrogeniônico (pH) diminuiu na medida que a temperatura de secagem aumenta apresentando diferença significativa entre os valores obtidos para todas as amostras, os quais variaram de 6,04 a 5,04 para o resíduo do extrato aquoso de gergelim *in natura* e para a farinha produzida a 75 °C, respectivamente, o que indica um pH levemente ácido. Silva et al. (2018) ao estudar a farinha do resíduo do extrato aquoso de gergelim seca a 65 °C por 48 horas, obteve um valor médio de pH de 6,06%, valor esse não tão distinto dos obtidos no presente estudo, porém pode-se considerar que a pequena diferença dê-se pela metodologia utilizada no processo de produção do extrato e/ou até mesmo pela variação dos grãos de gergelim.

A acidez titulável total também apresentou uma tendência de diminuição à medida que a temperatura de secagem aumenta, de modo que as farinhas secas sob as temperaturas de 45°C e 55°C apresentaram um percentual de acidez titulável de 0,68%, valor bem próximo ao do material *in natura* (0,67%), não apresentando diferença significativa entre eles, para as farinhas provenientes da secagem sob 65°C e 75°C o percentual de acidez titulável (0,59%) apresentou diferença significativa ao comparadas com as demais amostras. Os valores encontrados nesta pesquisa são mais elevados do que os obtidos por Lastra-Ripoll et al. (2022), que obteve um percentual de 0,48% para este parâmetro ao extrair hidrocolóides de gergelim em meio ácido, em contrapartida o presente estudo apresentou valores bem próximos ao atingido por Silva et al. (2018), que foi de 0,67% para farinha de gergelim.

Os resultados no presente estudo para o teor de cinzas apresentou maiores valores nas farinhas obtidas a partir da secagem a 55 °C e 75 °C, 2,43% e 2,63%, respectivamente, resultado que mostra uma variação não significativa nos valores em relação ao aumento da temperatura de secagem, considerando que não houve uma relação diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Estes valores são inferiores ao obtido por Sá et al. (2022) quando estudam a farinha de gergelim crua e obtiveram um percentual de cinzas igual a

4,5%, valor mais próximo ao percentual obtido para o resíduo *in natura* na pesquisa em questão (3,76).

Tratando-se das proteínas e os lipídios, ambos apresentam um comportamento inversamente proporcional ao aumento da temperatura, o que pode ser atribuído à desnaturação e degradação térmica de proteínas e lipídios durante o processo de secagem em temperaturas mais elevadas.

O teor de proteínas da farinha do resíduo do extrato aquoso de gergelim variou entre 20,29% e 19,35% para as temperaturas de 45 e 75 °C, respectivamente, valores bem próximos ao obtido por Medeiros et al. (2017) ao analisar a farinha de gergelim, os quais relataram um teor de proteína de 20% e Sá et al. que ao avaliar sementes de gergelim, obteve um teor de proteínas de 22,5%. Essa relação sugere que a farinha em estudo mesmo se tratando de um produto proveniente de um resíduo, apresenta um aporte proteico bem semelhante a um produto originado a partir de grãos *“in natura”*, fator esse que agrega valor a farinha do resíduo do extrato aquoso de gergelim, aumentando as possibilidades da sua aplicação na indústria alimentícia.

No que refere-se ao teor de lipídeos, com base nos valores obtidos (Tabela 7), pode-se observar que este parâmetro se mantém relativamente constante em todas as temperaturas de secagem, com valores entre 35,01 e 35,67% indicando que não sofreu interferência da temperatura, além do mais estes valores são menores que o alcançado por Silva et al. (2018) ao também estudar uma farinha proveniente do resíduo do extrato aquoso de gergelim, diferença esta que já era esperada, tendo em vista que no presente estudo foi realizado uma prensagem para extração do óleo antes da obtenção do extrato e conseqüentemente a obtenção do resíduo, a fim de alcançar um dos objetivos desta pesquisa que é desenvolver uma farinha desengordurada.

4 CONCLUSÃO

Os modelos matemáticos que apresentaram um maior ajuste aos dados da cinética de secagem do resíduo do extrato aquoso de gergelim foram Cavalcanti-Mata modificado e Page modificado. No que se refere aos valores obtidos quanto as propriedades termodinâmicas, ocorreu a diminuição da

entalpia com o aumento da temperatura do ar de secagem para todos os modelos analisados, enfatizando que quanto maior a temperatura de secagem menos energia é necessária para a remoção da água ligada ao produto. Foram obtidos valores negativos para entropia, os quais reduziram conforme o aumento da temperatura de secagem. Quanto a energia livre de Gibbs aumentou com a elevação da temperatura, apresentando valores positivos, indicando assim que a secagem não ocorreu de forma espontânea.

As farinhas obtidas a partir do resíduo do extrato aquoso de gergelim mostraram resultados satisfatórios em suas propriedades físico-químicas, destacando-se pelo baixo teor lipídico conforme buscado na pesquisa, e mantiveram um percentual similar de proteína em comparação ao material in natura. Isso sugere que todas as farinhas desenvolvidas têm potencial para serem aplicadas na indústria alimentícia, podendo ser utilizadas na produção de pães, bolos, biscoitos, barras de cereal ou suplementos alimentares. Atendendo à demanda de consumidores intolerantes e/ou alérgicos ao glúten, que procuram alimentos com baixo teor lipídico e alto teor de proteínas.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque Junior, N. de M. *Influência da secagem convectiva do resíduo agroindustrial de acerola verde na extração e encapsulamento de compostos bioativos*. 2022. 130f. Dissertação – Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Agrícola, Campina Grande – PB.
- Botelho, F. M. et al. (2018) Modelagem matemática da contração volumétrica de grãos de soja durante o processo de secagem. *Revista Engenharia na Agricultura*, 26 (1), 1-12.
- Cavalcanti-Mata, M. E. R. M. et al. (2020). A new approach to the traditional drying models for the thin-layer drying kinetics of chickpeas. *Journal of Food Process Engineering*. 43 (12), n/a. Doi:10.1111/jfpe.13569
- Corrêa, P. C. et al. (2017). Propriedades termodinâmicas do processo de secagem e absorção de água de grãos de arroz. *CyTA-Journal of Food*, v.15, p. 204-210.
- Cruz, N. F. F. S. et al. (2019). Características e tratos culturais do gergelim (*Sesamum indicum* L.). *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v.8, n.4, p.665-675.
- Jeske, S., Zannini, E., Arendt, E.K. (2018). Past, present and future: the strength of plantbased dairy substitutes based on gluten-free raw materials. *Food Res. Int.* 110, 42–51. Jiang, S., Ding, J., And.
- Jidean, V. A. & Mpotokwana, S. M. (2009). Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 182–188.
- Jorge, A. P. P. et al. (2021). Drying kinetics of 'gueroba' (*Syagrus oleracea*) fruit pulp. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 1, p. 2327.
- Lastra-Ripoll, Santander E.; Quintana, Somaris E.; García-Zapateiro, Luis A. (2022). Propriedades químicas, tecnológicas e reológicas de hidrocolóides de gergelim (*Sesamum indicum*) com potencial aplicação em alimentos. *Jornal Árabe de Química*, [local da publicação], v. 15, p. 104146. DOI: 10.1016/j.arabjc.2022.104146.
- Matin, A. et al. (2017). Effects of different airdrying temperature on sunflower seeds oil and ash content. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 21(1), 5-8.
- Martins, J. J. A. et al. (2014). Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. *Biosci. J.*, v. 30, n. 6, p. 1652-1660.

Melo, M. O. P. et al. (2021). Modelagem matemática da cinética de liofilização do extrato de gergelim ou “leite”. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.] , v. 2, pág. e40110212752, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12752.

Mendonça, A. P. Et al. (2015). Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 19, n. 4, p. 382-387.

Mohapatra, D.; Rao, P. S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, London, v. 66, n. 4, p. 513-518.

Park, K. J. B. et al. (2014) Secagem: fundamentos e equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 16 (1), 93-127. Doi:10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127.

Perez, L. G. et al. (2013). Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão impregnação. *Revista Ciência Agrônômica*, vol.44, n.1, p.102-106.

Rashid, M.T.et al. (2023). Cinética de secagem e dinâmica da qualidade de arroz preto germinado enriquecido com selênio seco assistido por ultrassom. *Ultrasonics Sonochemistry*, 106468. Doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106468

Resende, O., Ferreira, L.U., Almeida, D.P. (2010). Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, 12 (2), 171-178.

Ribeiro, V. H. A. et al. (2019). Mathematical modeling of apple drying kinetics. *Revista Higiene Alimentar*, v.33, n.288/289, p.3474-3478.

Sá, A. G. A. et al. (2022). Farinha de gergelim prensada a frio como fonte de proteína: efeito do processamento na digestibilidade da proteína, perfil de aminoácidos e propriedades funcionais. *Jornal de Composição e Análise de Alimentos*, v. 111, p. 104634. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104634.

Santos, N. C. et al. (2019). Study on drying of black rice (*Oryza sativa*L.) Grains:Physical-Chemical and Bioactive Quality. *Journal of Agricultural Science*, v.11, No.9.

Santos, N. C. Et al. (2020). Effect of ultrasound pre-treatment on the kinetics and thermodynamic properties of guava slices drying process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 66, p. 102507.

Sarpong, F. et al. (2019). Mitigating effect of relative humidity (RH) on 2-furoylmethyl-Amino acid formation. *LWT-Food Science and Technology*, v. 101, p. 551– 558.

Silva, D. R. S. et al. (2023). Estudo da aceitabilidade de biscoitos enriquecidos com farinha de resíduo de gergelim. *Cadernos Macambira*, 8(especial1), 123–129. <https://doi.org/10.59033/cm.v8iespecial1.1177>.

Silva, P. B. et al. (2018). Avaliação físico-química da farinha do resíduo do extrato aquoso de gergelim. In. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC*. n. 1. Maceió -AL.

Sousa, R. V. (2017). *Secagem em camada fina e espessa de grãos de arroz vermelho em casca: avaliação experimental, modelagem e simulação*. 2017. 207p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Sousa, A. P. M. et al. (2020a). Physical and chemical characterization of farinaceous product the central axis and pivot of jackfruit. *Research, Society and Development*, 9(9), e350997333- e350997333. 10.33448/rsd?v9i9.7333.

Sousa, A. P. M. et al. (2020b). Quality assessment flour of jacafruit shell. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(3), 1786-1796. 10.34188/bjaerv3n3-094.

Touil, A.; Chemkhi, S.; Zagrouba, F. (2014). Moisture Diffusivity and Shrinkage of Fruit and Cladode of *Opuntia ficus-indica* during Infrared Drying. *Journal of Food Process*, v. 2014, p. 1-9.

Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Arinos-Kouris, M D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253.