

Cinética de secagem de raspas de abóbora

Drying kinetics of Pumpkin slices

Frank Silva CABRAL¹; Samuel Gonçalves Ferreira dos SANTOS²; Dennis Ricardo Cabral CRUZ³; Vinícius Gonçalves ALMEIDA⁴; Renato Souza RODOVALHO⁵; Mônica Ferreira de MELO⁶

¹ Engenheiro Agrônomo, Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, franksilvacabral@gmail.com

² Autor para correspondência, Mestrando em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, samuel-2100@hotmail.com

³ Mestrando em Produção Vegetal, Universidade Federal de Goiás, Universidade Federal de Goiás, denisribral@gmail.com

⁴ Mestrandos em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, almeidaagropec@gmail.com

⁵ Doutor em Agronomia, Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, renato.rodvalho@ifgoiano.edu.br

⁶ Engenheira Agrônoma, Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, monicafmelo2012@hotmail.com

Recebido em: 19-08-2020; Aceito em: 30-12-2020

Resumo

O aumento pela busca por alimentos saudáveis, sem glúten e ricos em fibras abre oportunidade para a incorporação de olerícolas, como a abóbora. A secagem e o armazenamento são etapas essenciais para a obtenção de produtos de qualidade, contribuindo para minimização de perdas e, conseqüentemente, aumentando a vida útil dos produtos. Objetivou-se, com esta pesquisa, avaliar a cinética de secagem das raspas de abóbora em diferentes condições de secagem, bem como determinar suas propriedades termodinâmicas. Realizou-se a secagem das raspas de abóbora em sombra, estufa e secador experimental. Diversos modelos de regressão não linear foram ajustados aos dados experimentais para caracterizar o processo de secagem. A partir do modelo de Arrhenius foram obtidos os coeficientes da difusão e a energia de ativação para o cálculo da entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Conclui-se que Page foi o melhor modelo para representação da cinética de secagem das raspas de abóbora. A elevação da temperatura do ar de secagem proporciona o aumento da energia livre de Gibbs e da difusividade de água nas raspas de abóbora, reduz a entalpia e mantém a entropia negativa.

Palavras-chave adicionais: cabotiá; *Cucurbita maxima* x *Cucurbita moschata*; entalpia; entropia; secador experimental

Abstract

The increase in the search for healthy, gluten-free and fiber-rich foods opens the opportunity for the incorporation of vegetables, such as pumpkin. Drying and storage are essential steps to obtain quality products, contributing to minimizing losses and, consequently, increasing the useful life of the products. The objective of the present research was to evaluate the drying kinetics of pumpkin slices under different drying conditions, as well as to determine its thermodynamic properties. Pumpkin slices were dried in the shade, oven and experimental dryer. Several models of non-linear regression were adjusted to the experimental data to characterize the drying process. From the Arrhenius model, diffusion coefficients and activation energy were obtained to calculate enthalpy, entropy and Gibbs free energy. We conclude that Page was the best model for representing the drying kinetics of pumpkin slices; raising the temperature of the drying air increases the Gibbs free energy and the diffusivity of water in the pumpkin slices, reduces enthalpy and maintains negative entropy.

Additional keywords: cabotiá; *Cucurbita maxima* x *Cucurbita moschata*; enthalpy; entropy; experimental dryer

Introdução

O principal centro de diversidade da abóbora é o continente americano, mais precisamente a área central do México. As abóboras consistem em plantas de clima quente, com temperaturas ótimas para o desenvolvimento e frutificação, variando de 20 a 27 °C (Ferreira et al., 2017). Conforme Amaro et al. (2014), a abóbora conhecida como 'Tetsukabuto' ou 'Cabotiá' é um híbrido interespecífico, resultado do cruzamento entre linhagens selecionadas de moranga (*Cucurbita maxima* Duch.), utilizadas como genitores femininos, e linhagens de abóbora (*Cucurbita moschata* Duch.) genitores masculinos. Devido à boa adaptação às condições locais, esses híbridos têm grande importân-

cia econômica no Brasil.

A demanda por novos alimentos saudáveis e economicamente viáveis aumentou consideravelmente, agregando valor econômico à produção, além de contribuir para a formulação de novos produtos alimentícios e minimizar o desperdício (Naves et al., 2010). Se tratando dos resíduos, estes constituem 65-70% da massa total dos frutos conforme a espécie (Uchôa Thomaz et al., 2014). De acordo com Santos et al. (2018), um constituinte importante encontrado nos pães integrais é a fibra alimentar, assim, o aproveitamento de subprodutos agroindustriais de frutas, ricos em fibra, poderia acrescentar nutriente e inovação em formulações de panificação.

A secagem e o armazenamento são etapas essenciais para a obtenção de produtos de qualidade (Martinazzo et al., 2013). De acordo com Diógenes et al. (2013), a secagem é uma forma de minimizar perdas, possibilitando o transporte, o armazenamento e aumentando a vida útil, garantindo a viabilidade econômica e segurança microbiológica pela eliminação da água do material, através da evaporação. De acordo com Silva et al. (2015), a cinética de secagem consiste na rapidez com que um material perde umidade, e este fator é dependente de suas propriedades específicas; da temperatura; da velocidade do ar de secagem; e da umidade relativa do ar. Por meio do estudo da cinética de secagem é possível determinar as propriedades termodinâmicas que, de acordo com Oliveira et al. (2013), proporcionam o conhecimento da afinidade do solvente pela água e da espontaneidade do processo de sorção, sendo importante para projetar equipamentos de secagem.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a cinética de secagem das raspas de abóbora em diferentes condições de secagem, bem como determinar suas propriedades termodinâmicas.

Material e métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Preparo de Amostras e Agroindústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres, Goiás, Brasil (IF Goiano – Campus Ceres) nos dias 14 e 15/06/2019.

Os frutos de abóbora foram adquiridos no mercado local, sendo da variedade Tetsukabuto. A matéria-prima foi cortada em fatias com faca de aço inoxidável, realizando-se a remoção das sementes e da placenta. Em seguida, após a remoção da casca, realizou-se a lavagem da matéria-prima em água corrente.

Após a lavagem, realizou-se o processo de trituração em multiprocessador industrial para redução do tamanho, obtendo assim, as raspas de abóboras com médias de área $3,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, espessura de $0,021 \text{ m}$ e volume de $4,26 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$.

O teor de água inicial das raspas de abóbora, em base seca (b.s.), foi determinada utilizando estufa à $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas (ASAE, 2000). Para tanto, foram pesadas quatro repetições de 100 g em balança analítica, distribuídas em placas de petri e levadas à estufa para determinação desta propriedade.

As raspas com teor de água próximo a 8,20 decimal (b.s.), foram divididas em quatro repetições homogêneas e distribuídas em camadas delgadas (sem sobreposição) para cada método de secagem, sendo eles: sombra, secador experimental e estufa. As quatro repetições de 200 g cada (espalhadas em forma de alumínio de 468 cm^2 cada), foram pesadas em balança semianalítica.

As amostras foram depositadas em fôrmas de alumínio para secagem na sombra, em estufa de circulação e renovação de ar a $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Para a secagem em secador experimental, utilizou-se um secador de leito fixo, construído com chapa metálica número 14 e dois tambores de 200 L, com câmara de secagem circular com diâmetro de 58 cm (Figura 1). Foram acoplados quatro resfriadores do tipo centrípeto de 0,45 ampères, energizado por uma fonte de alimentação de 12 volts, com fluxo de ar de $0,031 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ cada, obtendo assim os fluxos do ar de secagem de $3,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $6,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $9,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $12,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Na câmara de secagem foram colocados quatro aros removíveis com fundo perfurado, com raio de 10 cm, para permitir a passagem de ar através da camada de produto, perfazendo para cada fluxo de ar utilizado, quatro repetições (Silva et al., 2019).

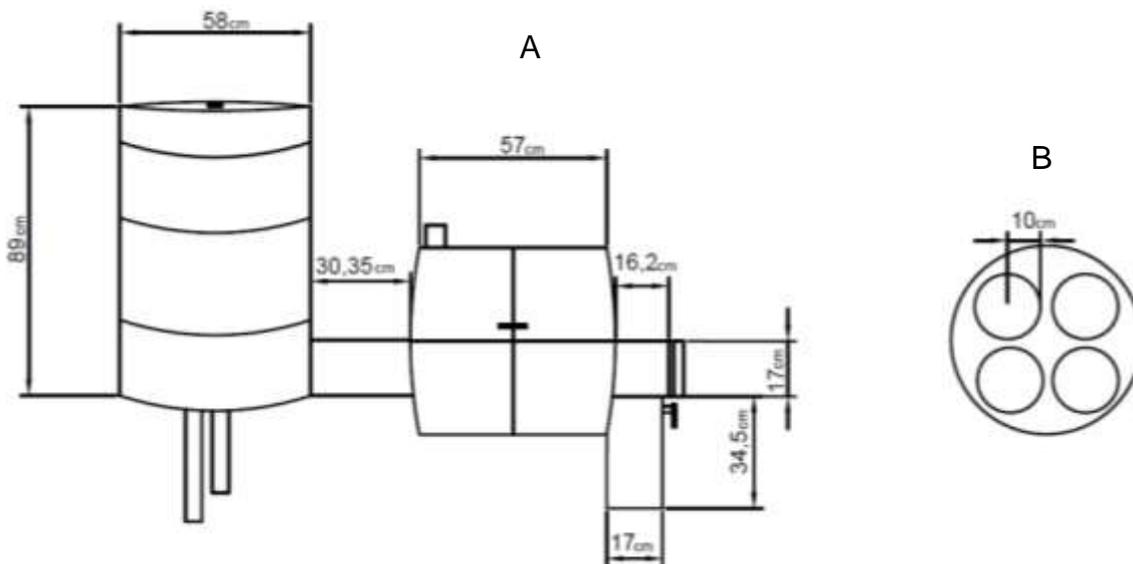


Figura 1 - A: Visão frontal do secador; B: Visão superior da câmara de secagem (Silva et al., 2019).

No secador experimental, as amostras foram depositadas nos quatro aros removíveis para realização da secagem.

Realizou-se ao todo 20 pesagens para cada condição de secagem em estudo, sendo o intervalo de cada pesagem de 20 minutos. O monitoramento da temperatura máxima e mínima foi realizado por um termômetro digital.

Ao final da secagem, foi determinado o teor de água em base seca e, posteriormente, realizado o cálculo da razão do teor de água (RX) durante os processos de secagem pela equação 1.

$$RX = \frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} \quad (1)$$

Em que: X – teor de água do produto, decimal b.s.; X_i – teor de água inicial do produto, decimal b.s.; X_e – teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

A partir do RX de cada condição de secagem, vários modelos empíricos utilizados em pesquisas relacionadas a cinética de secagem de produtos agrícolas foram ajustados aos dados experimentais, para representar as curvas de secagem de raspas de abóbora (Gomes et al., 2017), conforme a Tabela 1.

Tabela 1- Modelos de ajuste de dados experimentais de razão do teor de água das raspas submetidas a secagem

Descrição	Modelo
Aproximação por difusão	$RX = a \exp(-k \times t) + (1-a) \times \exp(-k \times b \times t)$
Dois Termos	$RX = a \exp(-k \times t) + b \times \exp(-k_1 \times t)$
Exponencial de dois termos	$RX = a \exp(-k \times t) + (1-a) \times \exp(-k \times a \times t)$
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k \times t)$
Henderson e Pabis Modificado	$RX = a \exp(-k \times t) + b \times \exp(-k_1 \times t) + c \times \exp(-k_2 \times t)$
Logaritmo	$RX = a \exp(-k \times t) + b$
Midilli	$RX = a \exp(-k \times t^n) + b \times t$
Midilli Modificado	$RX = \exp(-k \times t^n) + a \times t$
Newton	$RX = \exp(-k \times t)$
Page	$RX = \exp(-k \times t^n)$

RX – razão do teor de água da raspa, adimensional; t – tempo de secagem, em horas; k, k₁ e k₂ – coeficientes de secagem; a, b, c, d, n – constantes dos modelos, adimensionais;

Na seleção dos melhores modelos, para representar a cinética de secagem das raspas de abóbora, foram considerados a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado pelo modelo (R²), o erro médio estimado (SE) (equação 2), o erro médio estimado (P) (equação 3) e a distribuição dos resíduos. Para a recomendação do modelo matemático de cinética de secagem, foi verificado o R² mais próximo à unidade, valor de SE mais reduzido, valores de P menores que 10% e distribuição aleatória dos resíduos. A análise do comportamento dos resíduos gerado pelo modelo foi considerada aleatória quando os valores residuais se encontram em uma zona horizontal próximo de zero (Corrêa et al., 2014).

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

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (3)$$

Em que: SE – erro médio estimado; n – número de casos; Y – valor experimental; \hat{Y} – valor estimado; GLR – grau de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

O coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) foi obtido pelo ajuste do modelo da difusão líquida para forma

geométrica de placa plana aos dados experimentais da secagem, com a aproximação de 8 termos (equação 4). A espessura e o diâmetro das raspas de abóbora foram mensurados utilizando-se um paquímetro digital para obtenção de uma média para uso no modelo.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (4)$$

Em que: D_{ef} – coeficiente de difusão efetivo, m² s⁻¹; n – número de casos (termos); t – tempo, em segundos; L – espessura do produto, em metros.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) e a temperatura do ar de secagem foi realizado pelo modelo de Arrhenius (equação 5).

$$D_{ef} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R T_a} \right] \quad (5)$$

Em que: D₀ – fator pré-exponencial, m s⁻¹; E_a – energia de ativação, J mol⁻¹; R – constante universal dos gases, 8,314 J mol⁻¹ K⁻¹; T_a – temperatura absoluta, K.

As propriedades termodinâmicas entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, relacionadas ao processo de secagem das raspas de abóbora, foram determinadas através do método descrito por Jideani & Mpotokwana (2009), equações 6 a 8.

$$\Delta H = E_a - R T_a \quad (6)$$

$$\Delta S = R \left[\ln(D_0) - \ln\left(\frac{k_B}{h_P}\right) - \ln(T_a) \right] \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T_a \Delta S \quad (8)$$

Em que: ΔH – entalpia, J mol⁻¹; ΔS – entropia, J mol⁻¹; k_B – constante de Boltzmann, 1,38×10⁻²³ J K⁻¹; h_P – constante de Planck, 6,626×10⁻³⁴ J s⁻¹.

Resultados e discussão

As temperaturas médias do ar de secagem foram de 25,98 °C para o método da secagem em sombra, 43,33 °C para o secador experimental e 51,18 °C para o método da estufa. A temperatura de secagem para os métodos para secador experimental variou de

23,20 °C a 58,30 °C tendo como temperatura média de 51,18 °C. Para o método de secagem sombra, a temperatura mínima foi de 21,20 °C enquanto a temperatura máxima foi de 29,30 °C, apresentando um desvio padrão ± 3,29. Entre os três métodos de secagem, o método estufa apresentou desvio padrão mais próximo de zero (± 0,52), indicando maior uniformidade da temperatura ao longo da secagem (Tabela 1). Tal fato pode ser explicado pois a estufa possui um mecanismo de controle de temperatura, fator que não ocorre para o método de secagem a sombra e secador experimental, cuja temperatura é influenciada pelo meio.

Tabela 2- Temperatura máxima (T_{máx}), temperatura mínima (T_{mín}), temperatura média (T_{méd}) e desvio padrão obtidos nos métodos de secagem à sombra, em estufa e em secador experimental pela cinética de secagem das raspas de abóbora

Métodos de secagem	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	T _{méd} (°C)	Desvio Padrão
Secador Experimental	58,30	23,20	43,33	± 3,29
Sombra	29,30	21,20	25,98	± 2,09
Estufa	53,10	28,06	51,20	± 0,52

O teor de água das raspas de abóbora foi reduzido de 10,13 decimal em base seca (b.s.) para 2,97 decimais b.s. pelo método de secagem à sombra, para 1,11 decimal pelo método do secador experimental e para 0,51 decimal para o método da secagem em estufa, como apresentado na Figura 2. Verifica-se ainda na Figura 2, que o aumento da temperatura do ar de secagem possibilitou maior redução da água nas raspas de abóbora, devido ao acréscimo do gradiente de potencial hídrico existente entre as raspas de abóbora e o ar de secagem. O mesmo comportamento foi constatado por Borges et al. (2008) para fatias de abóbora (*Cucurbita moschata* L.) com área de 10,50×10⁻⁴ m² e para Arévalo-Pinedo & Murr (2005), para cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucurbita Aroces*).

Os períodos de secagem das raspas de abóbora foram de nove horas, para todos os métodos de secagem (secador experimental, sombra e estufa) condicionado ao fotoperíodo do mês de junho em que foi realizado o trabalho. Arévalo-Pinedo & Murr (2005) observaram que a temperatura de secagem exerce influência sobre a velocidade de secagem, sendo que o aumento da temperatura diminui o tempo de secagem. Cardoso et al. (2017) explicam que a perda do conteúdo de água é mais rápida no início do processo de secagem devido a quantidade de água disponível no ambiente, e que o aumento da temperatura possibilita a maior redução da água durante o processo de secagem e menor é o tempo até o alcance da umidade de equilíbrio devido ao gradiente de pressão.

Na Tabela 3, estão apresentados os critérios estatísticos de ajuste dos modelos. Verifica-se que todos os modelos apresentaram o R² próximo ao

máximo (100%), foram superiores a 83,22%. Com exceção dos modelos de Aproximação por difusão e Newton, os demais modelos obtiveram erro médio relativo (P) abaixo de 10% para os métodos de secagem em estufa, sombra e secador experimental, indicando ajuste adequado com base neste critério (Mohapatra & Rao, 2005). Verifica-se, também, que todos os modelos analisados apresentaram erro médio estimado (SE) com valores reduzidos, sugerindo ajuste adequado, pois quanto menor o valor do SE calculado, melhor é o ajuste do modelo (Draper & Smith, 1998). Entre os modelos com o valor de P abaixo de 10%, Henderson e Pabis Modificado apresentou os menores valores de SE.

A respeito dos resíduos, o modelo de Midilli modificado e Page apresentaram a distribuição aleatória para todos os métodos de secagem. Já o modelo de Newton apresentou a distribuição tendenciosa para todas as temperaturas.

Na Tabela 4, observam-se os parâmetros ajustados dos modelos de Midilli Modificado e do modelo de Page ajustado aos dados experimentais das raspas de abóbora. Observa-se que entre estes modelos, que obtiveram os melhores parâmetros estatísticos, apenas o modelo de Page apresentou significância de seus parâmetros em todos os métodos de secagem em estudo. Portanto, diante dos procedimentos estatísticos, o modelo mais indicado para representar a cinética de secagem das raspas de abóbora foi o de Page. O modelo de Page também foi recomendado por Perez et al. (2013) para secagem da polpa de cupuaçu pré-desidratada por imersão-impregnação na temperatura de 65 °C. Ainda na Tabela 4, verifica-se que os parâmetros “k” e “n” de

Page não apresentam tendência clara de comportamento, com a elevação da temperatura e, neste caso, podem ser tratados como variáveis empíricas. Os valores de “k” estando mais próximos a zero podem

indicar o efeito de secagem das raspas de abóbora e, conseqüentemente, a redução da água no interior do produto (Borges et al., 2008).

Tabela 3- Valores do coeficiente de determinação (R²), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e distribuição dos resíduos (Dist.) como critérios de ajuste dos modelos aos dados experimentais da secagem das raspas de abóbora, obtidos nos métodos de secagem à sombra, em estufa e em secador experimental

Método de Secagem	R ² (%)	P (%)	SE	Dist.	R ² (%)	P (%)	SE	Dist.
Aproximação por difusão								
Secador Experimental	97,80	10,15	0,12	T	97,77	10,00	0,12	T
Sombra	93,88	3,44	0,11	A	90,29	4,44	0,15	T
Estufa	93,31	5,50	0,13	T	91,17	8,39	0,17	A
Exponencial de dois termos								
Secador Experimental	97,87	8,77	0,12	T	97,77	10,00	0,12	T
Sombra	92,27	4,22	0,13	T	90,29	4,44	0,15	T
Estufa	93,23	5,56	0,13	A	91,17	8,39	0,17	A
Henderson e Pabis Modificado								
Secador Experimental	98,90	3,94	0,07	A	98,21	7,56	0,11	T
Sombra	93,20	3,67	0,12	T	91,22	4,33	0,15	T
Estufa	93,63	6,97	0,15	A	93,37	7,61	0,18	A
Midilli								
Secador Experimental	98,78	4,38	0,08	A	98,42	6,91	0,10	A
Sombra	95,06	3,57	0,11	T	95,05	3,54	0,11	A
Estufa	93,58	5,88	0,14	A	93,58	5,87	0,14	A
Newton								
Secador Experimental	97,75	9,78	0,12	T	97,76	9,61	0,12	A
Sombra	83,22	6,03	0,22	T	91,31	4,41	0,15	A
Estufa	89,61	11,00	0,22	T	93,38	5,51	0,13	A

T – Distribuição tendenciosa dos resíduos; A – Distribuição aleatória dos resíduos.

Tabela 4- Parâmetros dos modelos ajustados para os métodos de secagem à sombra, em estufa e em secador experimental pela cinética de secagem das raspas de abóbora

Método de Secagem	Midilli Modificado			Page	
	k	a	n	k	n
Secador Experimental	-0,0678 ^{ns}	-0,2775 ^{ns}	1,2267 ^{ns}	0,2668*	0,9862*
Sombra	0,0352*	0,0568*	1,8982*	0,0180*	1,6175*
Estufa	0,0680*	-0,0224 ^{ns}	1,2221*	0,0750*	1,3962*

* Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t; ^{ns} não significativo.

Ainda na Figura 2, percebe-se que o modelo de Page se ajustou bem, pois os dados experimentais estão próximos aos dados estimados por este modelo. Observa-se na secagem, que o método do secador experimental proporcionou maior perda de água e, em contrapartida, o método de secagem à sombra apresentou teor de água maior no final do processo.

A energia de ativação (E_a) foi obtida pelo ajuste do modelo de Arrhenius e seu valor foi de 29,9007 kJ mol⁻¹. Limpaboon (2011) encontrou valores semelhantes aos do presente trabalho, onde a energia de ativação para diferentes espessuras de fatias de abóbora foi entre 27,8361 e 37,8437 kJ mol⁻¹. Os diferentes valores de energia de ativação para diferentes produtos agrícolas podem ser atribuídos a características físicas e biológicas dos produtos (Martins et al., 2015).

Em relação a difusividade efetiva (D_{ef}) para as raspas de abóbora, foram encontrados os valores de 1,07×10⁻⁹; 9,88×10⁻⁹; 4,89×10⁻⁹ m² s⁻¹ para sombra, secador experimental e estufa, respectivamente. Os resultados apresentados são coerentes com os observados por Jangam et al. (2010), que afirmam que os produtos agrícolas, geralmente, apresentam valores de D_{ef} entre 10⁻¹³ a 10⁻⁷. Verificou-se, ainda, que não houve comportamento típico para a D_{ef}, onde geralmente a elevação da temperatura acarreta maiores valores desta propriedade. Isso provavelmente ocorreu devido à dificuldade em se manter a temperatura constante durante a secagem das raspas de abóbora no secador experimental. Na Figura 3, encontram-se os valores Ln(D_{ef}) relacionados ao inverso da temperatura em Kelvin (1/T_a (K⁻¹)) para as raspas de abóbora submetidas aos métodos de secagem.

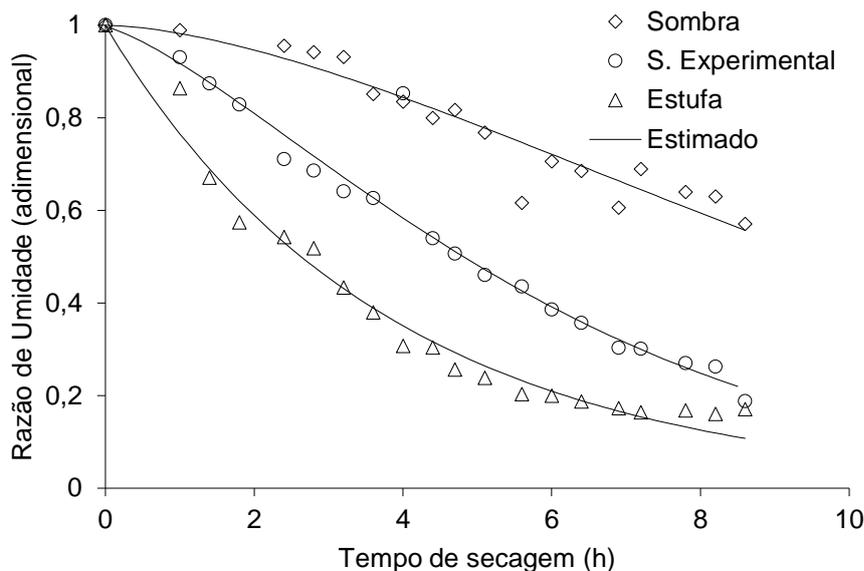


Figura 2 - Curvas de secagem estimadas pelo modelo de Page aos dados experimentais das raspas de abóbora submetidas a diferentes métodos de secagem.

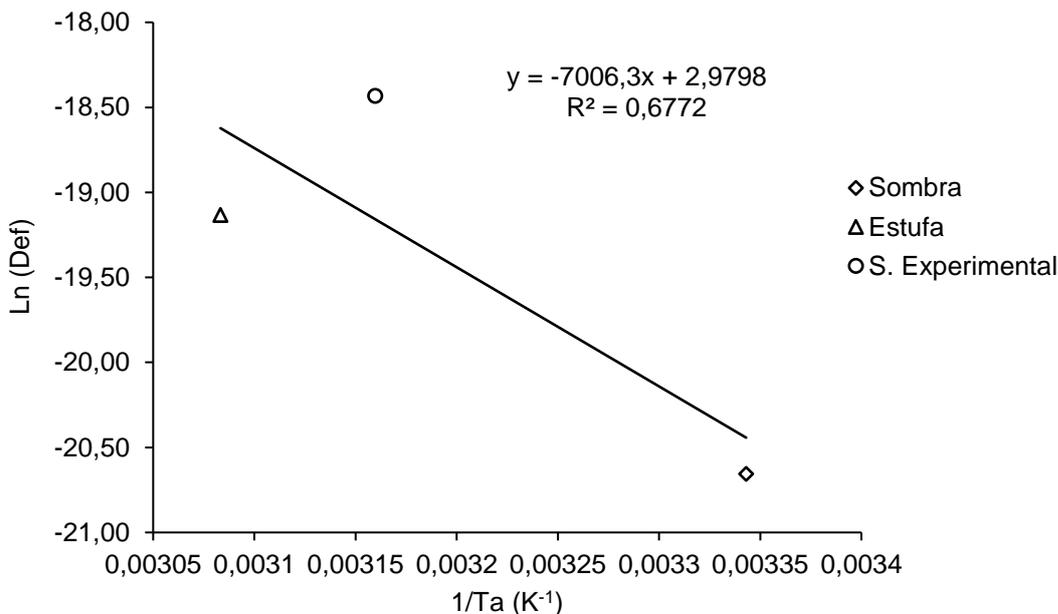


Figura 3 - Expressão de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetiva, em função do inverso da temperatura absoluta do ar, durante a secagem raspas de abóbora submetidas aos métodos de secagem

Os valores das propriedades termodinâmicas podem ser observados na Tabela 5. Verifica-se que a entalpia (ΔH) variou de 26,4091 para 26,2095 kJ mol^{-1} entre os métodos de secagem e, conseqüentemente, com o aumento da temperatura (25,98; 43,33 e 51,18 $^{\circ}\text{C}$). Tal fato, aponta que menores valores de variação de entalpia indicam menor energia necessária para remover a água ligada ao produto durante a secagem, conforme explicado por Oliveira et al. (2010).

O valor obtido da entropia (ΔS) foi de -0,3114; -0,3119 e -0,3121 kJ mol^{-1} para o secador experimental, sombra e estufa, respectivamente. Os valores negati-

vos ocorrem, segundo Corrêa et al. (2011), durante o processo de secagem em razão de que o teor de água diminui e, portanto, o movimento das moléculas de água fica mais restrito, pois há menos sítios disponíveis. Este fato também pode ser observado para raspas de abóbora.

Ainda na Tabela 5, nota-se que os valores da energia livre de Gibbs (ΔG) aumentaram com a elevação da temperatura dos métodos de secagem (119,7431; 125,1491 e 127,2302 kJ mol^{-1} para 25,98; 43,33 e 51,18 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente). Neste caso, o processo de secagem não foi espontâneo, sendo

necessária a adição de energia proveniente do ar em que as raspas de abóbora estivessem envoltas para que ocorresse a redução do teor de água. Conforme esclarece Oliveira et al. (2015), a energia livre de Gibbs busca medir a totalidade de energia associada a um

sistema termodinâmico e o seu valor positivo é explicado por uma adição de energia que envolve o produto para a ocorrência da mudança de fase (líquido para vapor).

Tabela 5- Propriedades termodinâmicas, entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) obtidas pela cinética de secagem das raspas de abóbora, obtidos nos métodos de secagem à sombra, em estufa e em secador experimental

Condição de secagem	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ .mol ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
Sombra	26,4091	-0,3114	119,7431
Secador- Experimental	26,2649	-0,3119	125,1491
Estufa	26,2095	-0,3121	127,2302

Conclusão

O modelo proposto por Page é o que melhor representa a cinética de secagem das raspas de abóbora.

A elevação da temperatura do ar de secagem, pelos métodos de secagem e condições estudados, proporciona o aumento da energia livre de Gibbs, a redução da entalpia e mantém a entropia negativa.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo Instituto Federal Goiano (Campus Ceres), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

Amaro GB, Pinheiro JB, Lopes JF, Carvalho ADF, Michereff Filho M, Vilela NJ (2014) Recomendações técnicas para o cultivo de abóbora híbrida do tipo japonesa. Embrapa Hortaliça (Circular técnica) 137(1):1-20.

ASAE (2000) – American Society of Agricultural Engineers. Moisture measurement-ungrounded grains and seeds, St. Joseph: ASAE, 563p.

Arévalo-Pinedo A, Murr FEX (2005) Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. Ciência e Tecnologia de Alimentos 25(4):636-643.

Borges SV, Mancini MC, Corrêa JLG, Nascimento DA (2008) *Secagem de fatias de abóboras (Cucurbita moschata, L.) por convecção natural e forçada*. Ciência e Tecnologia de Alimentos 28(1):245-251.

Cardoso IRM, Zuniga ADG, Fronza P, Maciel AG, Ferreira JS (2017) Análise da cinética e modelagem matemática da secagem da polpa de buriti (*Mauritia flexuosa* L). ENGEVISTA 19(5):1188-1197.

Corrêa PC, Botelho FM, Botelho SCC, Goneli ALD (2014) Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea* *Proccesso*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18(10):1047-1052.

Corrêa PC, Botelho FM, Oliveira GHH, Goneli ALD, Resende O, Campos SC (2011) Mathematical modeling of the drying *Proccesso* f corn ears. Acta Scientiarum Agronomy 33(1):575-581.

Diógenes AMG, Queiroz AJM, Figueirêdo RMF, Santos DC (2013) Cinética de secagem de grãos de abóbora. Revista Caatinga 26(1):71-80.

Draper NR, Smith H (1998) Applied regression analysis. New York: John Wiley & Sons 3: 712p.

Ferreira TA, Oliveira CR, Chaves PPN, Milhomens KKB (2017) Indução da frutificação paternocárpica de frutos em híbrido de abóbora japonesa com 2,4-D sob condições de temperatura elevada. Nucleus 14(1): 145-152.

Gomes NHF, Silva Neto HC, Alves JLL, Rodovalho RS, Sousa CM (2017) Cinética de secagem de folhas de *Cymbopogon citratus*. ENGEVISTA 19(2):328-338.

Jangam SV, Law CL, Mujumdar (2010) Drying of foods, vegetables and fruits. Singapore: National University of Singapore, 232p.

Jideani V, Mpotokwane SM (2009) Modeling of water absorption of Botswana Bambara varieties using Peleg's equation. Journal of Food Engineering 92(2):182 – 188.

Limpaiboon K (2011) Effects of temperature and slice thickness on drying kinetics of pumpkin slices. Walailak Journal of Science and Technology 8(2):159-166.

Martinazzo AP, Melo EC, Demuner AJ, Berbet PA (2013) Avaliação do óleo essencial folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf após o processo de secagem. Boletim Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas 12(1):115-122.

Martins EAS, Lage EZ, Goneli ALD, Hartmann Filho CPH, Lopes JG (2015) Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 19(1):238-244.

Mohapatra D, Rao PS (2005) A thin layer drying model of parboiled wheat. Journal of Food Engineering 66(1):513-518.

Naves LP, Corrêa AD, Santos CD, Abreu CMP (2010) Componentes antinutricionais e digestibilidade protéica em sementes de abóbora (*Cucurbita maxima*) submetidas a diferentes processamentos. Ciência e Tecnologia de Alimentos 30(1):180-184.

Oliveira DECD, Resende O, Smaniotto TADS, Sousa KAD, Campos CC (2013) Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. Pesquisa Agropecuária Tropical 43(1): 50-56.

Oliveira GHH, Aragão DMS, Oliveira APLR, Silva MG, Gusmão ACA (2015) Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. Brazilian Journal of Food Technology 18(4):314-321.

Oliveira GHH, Corrêa PC, Araújo EF, Valente DSM, Botelho FM (2010) Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). International Journal of Food Science and Technology 45(3):546-554.

Perez LG, Oliveira FMN, Andrade JS, Moreira Filho M (2013) Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação. Revista Ciência Agronômica 44(1): 102-106.

Santos CMD, Rocha DA, Madeira RAV, Queiroz EDR, Mendonça MM, Pereira J, Abreu CMPD (2018) Preparação, caracterização e análise sensorial de pão integral enriquecido com farinha de subprodutos do mamão. Brazilian Journal of Food Technology 21(1):1-9.

Silva ESS, Oliveira J, Machado AV, Costa RO (2015) Secagem de Grãos e Frutas: Revisão Bibliográfica. Revista Brasileira de Agrotecnologia 5(1):19-23.

Silva JPS, Oliveira VHQ, Santos SGFD, Rodovalho RS, Queiroz JS, Silva DP (2019) Cinética de secagem dos grãos de soja em secador experimental. Global Science and Technology 12(12):15-30.

Uchôa Thomaz AMA, Sousa EC, Lima A, Lima RMT, Freitas PAP, Sousa MAM, Thomaz JCA, Carioca OB (2014) Elaboração e aceitabilidade de produtos de panificação enriquecidos com semente de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó. Holos 5(1):199-210.