

Resumo: O Brasil é atualmente o sétimo produtor mundial de abacate, podendo gerar até 2,8 mil litros de óleo por hectare. Para a obtenção do óleo de boa qualidade é necessário que a água seja removida. Para tanto, objetivou-se com este trabalho avaliar a cinética de secagem da polpa de abacate, pelo método de camada de espuma, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, bem como definir suas propriedades termodinâmicas. Foram utilizados como matéria-prima frutos de abacate do tipo 'quintal', adquiridos no comércio local na cidade de Ceres – GO, para cada temperatura foi destinado 200g de polpa, com adição de 5% do peso de polpa de emulsificante (Emustab Selecta®). A secagem da espuma foi conduzida em estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas do ar de secagem de 50, 60, 70 e 80 °C. O modelo de Wang e Sing apresentou melhor ajuste aos dados experimentais da cinética de secagem da polpa de abacate em camada de espuma. O aumento da temperatura do ar de secagem promoveu redução no tempo necessário para a remoção de água da polpa de abacate em camada de espuma. A elevação da temperatura do ar de secagem promoveu o aumento do coeficiente de difusão efetivo, que apresentando energia de ativação para a difusão líquida, de 39,472 kJ mol⁻¹.

Palavras-chave: Difusividade, Propriedades Termodinâmicas, Teor De Água.

Abstract: Brazil is currently the seventh world producer of avocados, which can generate up to 2800 liters of oil per hectare. For obtaining the oil of good quality it is necessary that water is removed. Therefore, the aim of this study was to evaluate the avocado pulp drying kinetics, the foam layer method at temperatures of 50, 60, 70 and 80 °C and set its thermodynamic properties. Were used as raw material avocado fruits of 'backyard', purchased in local shops in the city of Ceres - GO, for each temperature was intended 200g pulp with addition of 5% of emulsifier pulp weight (Emustab Selecta®). Drying of the foam was carried out in an oven with forced air circulation, the drying air temperatures of 50, 60, 70 and 80 °C. The model presented Wang and Sing best fit to the experimental data of the avocado pulp drying kinetics foam layer. The increase in drying air temperature decreased the time required for removing water from the avocado pulp foam layer. The elevated drying air temperature promoted the increase of the effective diffusion coefficient, which presenting activation energy for liquid diffusion of 39.472 kJ mol⁻¹.

Keywords: Diffusivity, Thermodynamic Properties, Moistures Content.

¹ Eng. Agrônomo, Téc. Administrativo, Mestrando em Agronomia, Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, jaliston.alves@ifgoiano.edu.br.

² Eng. Agrícola, Prof. Doutor, Agronomia, Instituto Federal Goiano – Campus Ceres – GO, renato.rodovalho@ifgoiano.edu.br.

INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa, atualmente a 7ª posição mundial como produtor de abacate, produzindo 152.181 toneladas em 11.637 hectares distribuídos em todo o país, principalmente nas regiões Sudeste e Sul (CANTUARIAS-AVILÉS, 2015). A participação brasileira no mercado mundial ainda é muito restrita, principalmente pela baixa produtividade dos frutos, em média de 10 a 25 t ha⁻¹ (AGUIAR et al., 2014).

O abacate possui polpa rica em gorduras monoinsaturadas e substâncias medicinais. Aproximadamente 80% do peso do abacate se referem à polpa, que apresenta alto teor de lipídeos, razão pela qual o aproveitamento do óleo é a principal finalidade de sua industrialização (OLIVEIRA et al., 2008). Podendo-se extrair de 2,2 a 2,8 mil litros de óleo por hectare de abacate, número considerado como elevado quando comparado com a extração de outros óleos (GIRARDI, 2009).

O principal obstáculo para a obtenção do óleo é o alto teor de água presente nos frutos, afetando assim o rendimento da sua extração, sendo indicado o processo de secagem antes de qualquer procedimento industrial para a obtenção de produtos mais nobres, como, por exemplo, o óleo de abacate (ALVES, 2010).

A desidratação em camada de espuma tem a característica de conservar a qualidade dos produtos, oferecendo grandes possibilidades comerciais, podendo ser aplicadas inúmeros produtos que apresentem grande teor de água, como tamarindo (SILVA et al., 2008), polpa de cajá-manga (BREDÁ; JUSTI; SANJINEZ-ARGANDOÑA, 2013), graviola (BAPTESTINI et al., 2015), cupuaçu (SOUZA, 2011), ceriguela (FURTADO et al., 2010), a vantagem desse método, está no menor tempo de desidratação, devido à maior área de superfície exposta ao ar (SANKAT & CASTAIGNE, 2004).

A secagem de produtos agrícolas pode ser descrita por modelos matemáticos, que são ferramentas úteis na estimativa do tempo

necessário para redução do teor de água do produto, sob diferentes condições de secagem, auxiliando nas tomadas de decisão e contribuindo na melhoria da eficiência do processo (ANDRADE et al., 2003; SOUSA et al., 2011). A cinética de secagem pode ser definida como a rapidez com que o alimento perde água, sendo controlada pelas características da matriz do alimento e pelas variáveis temperatura, velocidade e umidade relativa do ar (COLESTINO, 2010).

Conforme o exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar a cinética de secagem da polpa de abacate, pelo método de camada de espuma, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, bem como definir suas propriedades termodinâmicas.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Fisiologia Vegetal do IF Goiano – Campus Ceres, no município de Ceres – GO. No período de agosto a setembro de 2015.

Foram utilizados como matéria-prima frutos de abacate do tipo ‘quintal’, adquiridos no comércio local na cidade de Ceres – GO, para cada temperatura foi destinado 200g de polpa, com adição de 5% do peso de polpa de emulsificante (Emustab Selecta®).

Os frutos foram colocados em ambiente protegido da luz e de umidade durante 7 dias, para que atingissem o ponto de maturação, apresentando-se macios ao toque quando levemente apertados. Os frutos foram destinados para a lavagem com escova de cerdas plásticas macias e detergente neutro, seguindo para a sanitização, com imersão dos frutos em solução de hipoclorito de sódio com concentração de 10ppm, por 15min, para então serem despulpados. Os frutos foram cortados e a polpa retirada com uso de espátula metálica e armazenada em um béquer com capacidade para um litro.

A espuma foi elaborada pela mistura, homogeneização da polpa e a adição de 5% de Emustab Selecta® durante cinco minutos em

misturador doméstico, batedeira da marca KitchenAid®, modelo KEA30, 300w de potência, em velocidade alta, 220 rpm. A espuma produzida foi espalhada sobre placas de petri com diâmetro médio de 96,05cm, formando uma camada de aproximadamente 1cm de espessura, mensurada com auxílio de paquímetro digital.

A secagem da espuma foi conduzida em estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas do ar de secagem de 50, 60, 70 e 80 °C. As placas contendo o produto foram removidas periodicamente para elaboração das curvas de secagem e acompanhamento do material, seguindo um intervalo de 20min, sendo considerada a situação de equilíbrio higroscópico quando a variação da massa dos recipientes não excedia 0,01g durante três pesagens consecutivas. O experimento foi conduzido contando com três repetições e a determinação da umidade relativa do ar de secagem foi realizada com o software Grapsi, com os dados obtidos por termômetros posicionados no interior da estufa de circulação forçada e no ambiente do laboratório.

A determinação da umidade total do produto foi realizada pelo método gravimétrico em estufa de circulação forçada de ar, conforme método proposto pela ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (2016) e adaptado por Breda; Justi; Sanjinez-Argandoña (2013) a 70 °C, por 24 horas para evitar a deterioração da amostra.

Para a determinação das razões do teor de água (RX) da camada de espuma de polpa de abacate durante a secagem, nas diferentes temperaturas do ar de secagem, a Equação 1, foi utilizada:

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

em que:

RX = razão do teor de água, adimensional;

X = teor de água do produto no tempo t, decimal base seca;

X_e = teor de água de equilíbrio do produto, decimal base seca; e

X_i = teor de água inicial do produto, decimal base seca.

Diferentes modelos propostos na literatura (Breda; Justi; Sanjinez-Argandoña, 2013; Furtado et al., 2010; Melo et al., 2013; Silva et al., 2008) foram utilizados para prever a cinética de secagem de polpa de frutas em camada de espuma (Tabela 1):

Tabela 1: Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem em camada de espuma da polpa de abacate (*Persea americana* Mill), nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C

Modelo	Equação	Referência
Cavalcante Mata	$RX = a_1 \exp(bt^{a_2}) + (a_3) \exp(bt^{a_2}) + a_5$	(2)
Dois termos	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(3) Corrêa et al. 2010
Exponencial de Dois termos	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	(4) Costa et al. 2015
Handerson & Pabis modificado	$RX = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(5) Costa et al. 2015
Handerson & Pabis	$RX = a \exp(-kt)$	(6) Baptestini et al. 2015
Logarítmico	$RX = a \exp(-kt) + b$	(7) Corrêa et al. 2010
Logistic	$RX = \frac{a_0}{1 + \exp(kt)}$	(8) Rodovalho 2014
Midilli	$RX = a \exp(-kt^n) + bt$	(9) Baptestini et al. 2015
Newton	$RX = \exp(-kt)$	(10) Martinazzo et al. 2007
Page	$RX = \exp(-kt^n)$	(11) Baptestini et al. 2015
Wang & Singh	$RX = 1 + (at) + (bt^2)$	(12) Costa et al. 2015

em que:

a , b , c = coeficientes dos modelos, adimensionais;

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizado a análise de regressão não-linear pelo método Gauss-Newton, realizado no *software* STATISTICA 7.0®. Para determinar o grau de ajuste para cada temperatura de secagem em camada de espuma da polpa de abacate, foram considerados a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando nível de 5% de significância, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado pelo modelo (R^2), o erro médio relativo (P) (Equação 13), o desvio quadrático médio (DQM) (Equação 14) e distribuição dos resíduos

$\hat{Y}$ = valor calculado pelo modelo;

n = número de dados observados.

k = constante de secagem, h^{-1} ;

t = tempo, h; e

RX = razão do teor de água, adimensional.

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

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

em que,

P = erro médio relativo, %;

DQM = desvio quadrático médio, decimal;

Y = valor observado experimentalmente;

A equação para difusão de água (Equação 15) é a solução analítica da segunda lei de Fick. Desconsiderando a contração volumétrica do produto, considerando a forma geométrica

circular adquirida pelo produto em função do recipiente e a condição do contorno do teor de água conhecido na superfície do produto (Alves, 2010; Corrêa et al., 2010).

O ajuste do modelo da difusão líquida para forma geométrica circular (Equação 15), aos dados experimentais da secagem em camada de espuma da polpa de abacate, foi realizado para a determinação do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}), com a aproximação de 6 termos.

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[\frac{-n^2 D_{ef} \pi^2 t}{r^2} \right] \quad (15)$$

em que:

D_{ef} = coeficiente de difusão efetivo, $m^2 s^{-1}$;

r = raio equivalente, m;

n = número de termos; e

t = tempo, s.

A obtenção dos coeficientes do modelo de Arrhenius foi realizada com a aplicação do logaritmo (Equação 16) (Resende et al., 2008).

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_a} \quad (16)$$

em que:

D_0 = fato pré-exponencial, h^{-1} ;

E_a = energia de ativação, $J mol^{-1}$;

R = constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$; e

T_a = temperatura absoluta, K.

A determinação das propriedades termodinâmicas da secagem em camada de espuma da polpa de abacate foi realizada pelo método descrito por Corrêa et al., 2010. Foram realizados os cálculos da entalpia (ΔH) (Equação 17); a entropia (ΔS) (Equação 18); e a energia livre de Gibbs (ΔG) (Equação 19).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (17)$$

$$\Delta S = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (18)$$

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S \quad (19)$$

em que:

ΔH = entalpia, $J mol^{-1}$;

ΔS = entropia, $J mol^{-1}$;

ΔG = energia livre de Gibbs, $J mol^{-1}$;

k_B = constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J K^{-1}$; e

h_p = constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} J s^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas de secagem em camada de espuma da polpa de abacate para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, em forma decimal, RU (Razão de Umidade) em função do tempo.

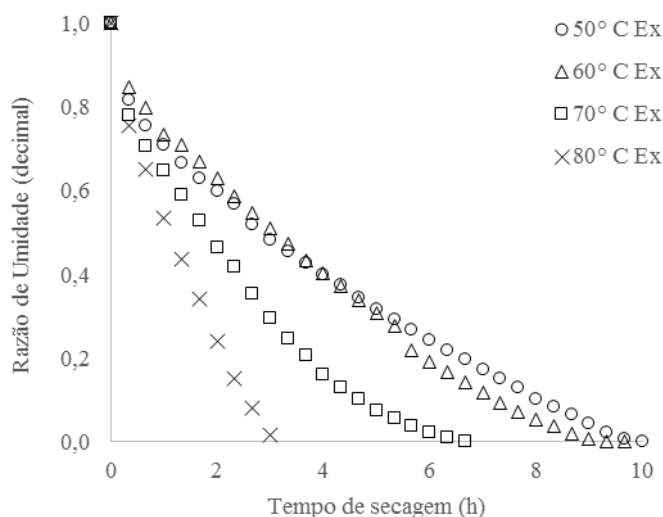


Figura 1. Razão do teor de água da espuma da polpa de abacate durante secagem em camada para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

Os períodos de secagem em camada de espuma da polpa de abacate foram de até 10h; 9h e 40min; 6 h e 40 min; e de 4h e 40min, para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C respectivamente. A umidade relativa do ar de secagem variou de 10,44% até 29,01% para 50°C, de 5,09% até 15,01% para 60 °C, de 1,81% até 8,11% para 70°C e de 3,94% até 3,12% para 80°C.

A redução do tempo de secagem também foi observado por Silva et al. (2008) que trabalharam com secagem de polpa de tamarindo e Furtado et al. (2010) com polpa de ceriguela. Dantas (2010) observou que o menor período de secagem foi obtido com aumento da temperatura, possibilitando a redução do tempo de secagem,

porque a diferença entre a pressão de vapor do ar de secagem e da película líquida que separa as bolhas da espuma aumenta com a temperatura, proporcionando maior redução de água em menor período.

A tabela 2 mostra os valores de P, DQM, e R^2 obtidos pelo ajuste dos modelos por meio de regressão não-linear aos dados experimentais com as temperaturas do ar de secagem de 50, 60, 70 e 80°C.

Tabela 2. Valores do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro médio estimado (DQM), como critérios de ajuste dos modelos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma da polpa de abacate, obtidos nas temperaturas do ar de 50, 60, 70 e 80°C.

Cavallante e Mata				Midilli			
T (°C)	R^2 (%)	DQM	P (%)	T (°C)	R^2 (%)	DQM	P (%)
50	17,63	0,0000	0,6287	50	87,68	0,0000	0,2602
60	16,29	0,0000	0,7101	60	93,67	0,0003	0,1948
70	26,26	0,0000	1,0341	70	93,23	0,0007	0,3142
80	27,12	0,0000	2,2977	80	80,28	0,0011	1,3707
Dois termos				Newton			
50	85,68	0,0666	0,2668	50	85,17	0,1005	0,2714
60	90,95	0,0984	0,2295	60	90,94	0,0934	0,2299
70	91,87	0,0730	0,3375	70	91,83	0,0792	0,3378
80	75,25	0,2330	1,3136	80	74,78	0,2102	1,3455
Exponencial de Dois Termos				Page			
50	85,21	0,1030	0,2710	50	85,17	0,0965	0,2711
60	91,79	0,1173	0,2176	60	85,18	0,1231	0,2174
70	92,12	0,0826	0,3309	70	91,99	0,0845	0,3329
80	76,21	0,2431	1,2853	80	76,62	0,2491	1,2633
Henderson e Pabis				Wang e Sing			
50	85,53	0,0615	0,2724	50	84,26	0,1525	0,2824
60	91,79	0,0991	0,2303	60	92,86	0,0888	0,2043
70	91,85	0,0706	0,3406	70	92,03	0,0880	0,3234
80	74,96	0,2430	1,3608	80	80,14	0,0464	1,3426
Henderson e Pabis Modificado				Logarítmico			
50	85,68	0,0666	0,2668	50	17,63	0,0000	0,6287
60	85,68	0,0985	0,2295	60	16,29	0,0985	0,2295
70	91,87	0,0730	0,3375	70	26,26	0,0000	1,0341
80	77,33	0,2175	1,2774	80	27,12	0,0000	2,2977

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) não apresentaram ajustes satisfatórios para todas as temperaturas estudadas, no entanto o coeficiente de determinação sozinho, não constitui um bom critério para a seleção de modelos não-lineares; por isso os valores de erro médio relativo (P) e desvio quadrático da médio (DQM) foram considerados. Todos os modelos apresentaram valores significativos para erro médio relativo (P), uma vez que os valores devem ser inferiores a 10%, indicando bom

ajuste para fins práticos (MOHAPATRA & RAO, 2005). A capacidade de um modelo descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio quadrático médio (DQM) (DRAPER & SMITH, 1998).

Verifica-se que dentre os modelos empregados, o de Wang e Sing, apresentaram os maiores valores de R^2 , acima de 80%, bem como valores de erro médio (P%) satisfatórios, o mesmo se aplica para os valores de DQM. Valores

similares foram encontrados por (SOUSA et al., 2011) com a aplicação do modelo de Midilli, trabalhando com polpa de oiti, para a secagem de polpa de abacate em camada de espumas os

parâmetros para do modelo de Midilli modelo não foram significativos conforme Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados para as temperaturas do ar de secagem dos modelos aos dados experimentais da secagem em camada de espuma da polpa de abacate, obtidos nas temperaturas do ar de 50, 60, 70 e 80 °C.

Modelos	T (°C)	Parâmetros					
		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b
Cavalcante e Mata	50	0,1652*	4,0000*	0,4990*	4,00*	0,3358*	0,001*
	60	-6,3432*	4,0000*	7,0062*	4,00*	0,3370*	0,001*
	70	-6,4603*	4,0000*	7,1682*	4,00*	0,2922*	0,001*
	80	-7,1056*	4,0000*	7,9090*	4,00*	0,1966*	0,001*
	T (°C)	a	b	k	k ₁		
Dois termos	50	0,9302*	0,0698*	0,0039*	10,8821*		
	60	1,0095*	-0,0095*	0,0044*	10,8821*		
	70	0,9763*	0,0237*	0,0071*	10,8821*		
	80	1,1321*	-0,1321*	0,0146*	10,8821*		
	T (°C)	a	k				
Exponencial de Dois Termos	50	1,3545*	0,0047*				
	60	1,6623*	0,0057*				
	70	1,5396*	0,0088*				
	80	1,8199*	0,0188*				
	T (°C)	a	a ₂				
Henderson e Pabis	50	0,9496*	0,0044*				
	60	1,0067*	0,0044*				
	70	0,9865*	0,0072*				
	80	1,0494*	0,0137*				

Tabela 4. Continuação

	T (°C)	a	b	c	k	k ₁	k ₂
Henderson e Pabis Modificado	50	0,7345*	0,0698*	0,1957*	0,0039*	0,4420*	0,0039*
	60	0,7763*	-0,0095*	0,2332*	0,0044*	5,0000*	0,0044*
	70	0,8477*	0,0236*	0,1286*	0,0071*	5,0000*	0,0071*
	80	43,7610*	0,5377*	-43,2987*	0,0271*	5,0000*	0,0280*
	T (°C)	a	b	k			
Logarítmico	50	0,6642*	0,3358*	10*			
	60	0,6630*	0,337*	10*			
	70	0,7078*	0,2922*	10*			
	80	0,8034*	0,1966*	10*			
	T (°C)	a	b	n	k		
Midilli	50	0,9965*	-0,0007*	0,4809*	0,0389 ^{ns}		
	60	0,9711*	-0,0005*	0,8111*	0,0073 ^{ns}		
	70	0,9757*	-0,0005*	0,8380*	0,0121 ^{ns}		
	80	0,9794*	-0,0009 ^{ns}	1,0114*	0,0085 ^{ns}		
	T (°C)	k					
Newton	50	0,0042*					
	60	0,0044*					
	70	0,0073*					
	80	0,0132*					
	T (°C)	n	k				
Page	50	0,9781*	0,0048*				
	60	1,1741*	0,0017*				
	70	1,0778*	0,0049*				
	80	1,3722*	0,0023 ^{ns}				
	T (°C)	a	b				
Wang e Sing	50	-0,0032*	2,62x10 ^{-06*}				
	60	-0,0032*	2,47x10 ^{-06*}				
	70	-0,0052*	7,06x10 ^{-06*}				
	80	-0,0082*	1,52x10 ^{-06*}				

* Significativo a 5 % pelo teste t; ^{ns} Não significativo

Em relação aos valores da razão do teor de água (RX), obtidos, experimentalmente, e estimados pelos modelos de Wang e Sing, nota-se que os dados experimentais se encontram próximos ao pondo de origem, representando a igualdade entre os valores observados e estimados, com uma tendência de variação entre zero e um

(Figura 2). Portanto, os valores de RX calculados, pelos modelos de Wang e Sing, podem ser utilizados na representação do comportamento da secagem em camada de espuma da polpa de abacate, obtidos nas temperaturas do ar de 50, 60, 70 e 80°C.

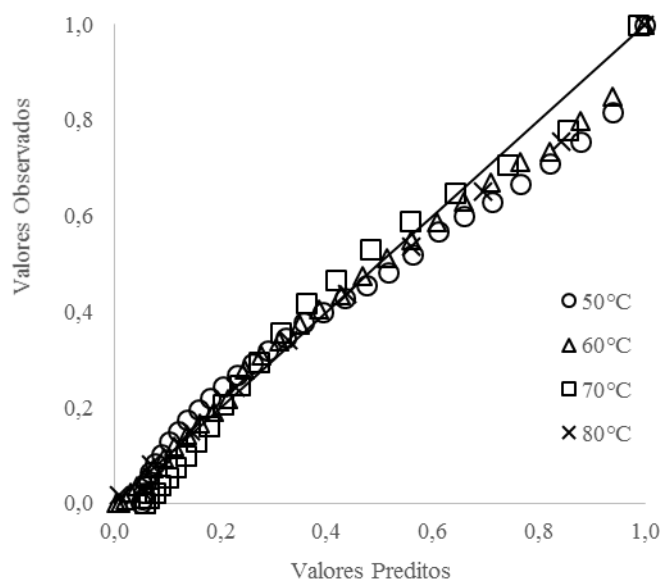


Figura 2. Valores estimados e observados da razão do teor de água, pelos modelos de Wang e Sing, para secagem em camada de espuma da polpa de abacate, obtidos nas temperaturas do ar de 50, 60, 70 e 80°C.

Pelas curvas de secagem, ajustadas por Wang e Sing, verifica-se que o aumento da temperatura acarreta maior taxa de secagem estimada, pelo modelo, vistos também nos dados experimentais Ceylan; Aktaş; Doğan (2007), que avaliaram a cinética de secagem da polpa do abacate.

(Figura 3). Este fato pode ser explicado, por causa do aumento da temperatura do ar de secagem. A mesma observação foi realizada por

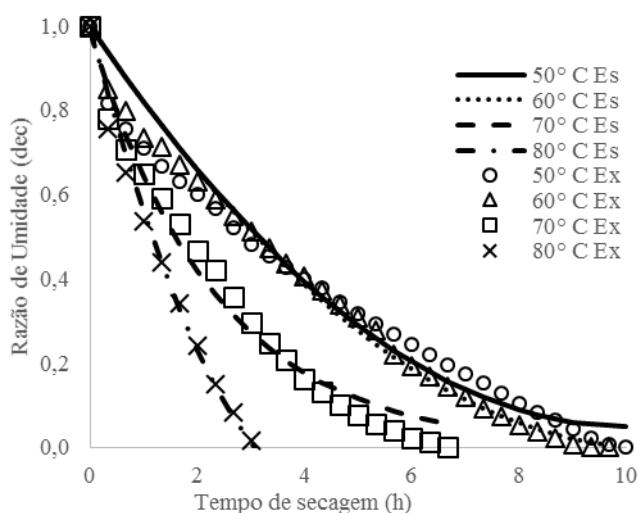


Figura 3. Curvas de secagem estimadas (Es), pelo modelo de Wang e Sing, e os dados de secagem em camada de espuma da polpa de abacate, para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C.

Em relação aos parâmetros usados para a determinação do coeficiente de difusão efetivo

(D_{ef}) são considerados como a forma geométrica circular, no qual a polpa de abacate adquire o formato do recipiente usado para realizar o processo de secagem, divergindo dos ensaios realizados por Alves (2010) que também usaram recipientes para cinética de secagem do abacate.

Os valores da difusividade efetiva obtidas para as diferentes temperaturas ar de secagem testados são demonstrados na Figura 4. Observou-se um comportamento linear crescente em que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram em resposta a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando valores de $2,14 \times 10^{-7}$; $2,19 \times 10^{-7}$; $3,73 \times 10^{-7}$; $7,27 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Estes resultados são coerentes com as observações de Costa et al. (2015); Ferreira et al. (2012) e Menezes et al. (2013)

que, de acordo com resultados obtidos e trabalhando com secagem de material vegetal,

verificaram que com o aumento da temperatura aconteceu também elevação da difusividade efetiva. Isto ocorre, pois a difusividade representa a velocidade com que a água migra do interior para a superfície do material, sendo então vaporizada (Goneli et al., 2014).

A elevação da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando, diretamente na resistência do fluido ao escoamento, fazendo com que sua redução acarrete em maiores facilidades da difusão das moléculas de água (CORRÊA et al., 2010).

Pela equação de Arrhenius, verifica-se que os valores de $\ln(D_{ef})$, em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T_a$), reduziram de -14,13 a 80 °C para -15,35 a 50 °C (Figura 5). Este comportamento também foi observado para secagem de bagaço de uva por Ferreira et al. (2012) e por Martinazzo et al. (2007), pressupondo que a difusividade efetiva, em função da temperatura, controla o processo de secagem em período decrescente.

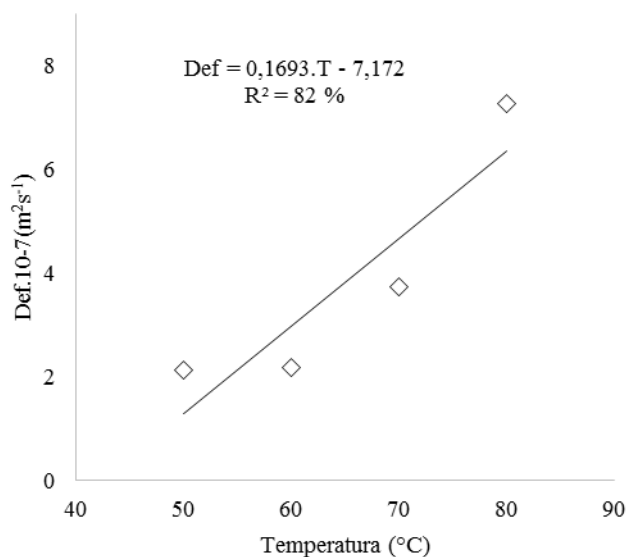


Figura 4. Valores do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) (m^2s^{-1}) obtidos para secagem em camada de espuma da polpa de abacate, para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C.

O valor da energia de ativação (E_a) foi obtido pelo ajuste da expressão de Arrhenius, para o coeficiente de difusão efetivo de secagem em

camada de espuma da polpa de abacate (Tabela 4). A energia de ativação (E_a), para o modelo da difusão líquida camada de espuma da polpa de

abacate, foi de 39,472 kJ mol⁻¹ (Tabela 4). A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto (KASHANINEJAD et al., 2007). sendo um valor comum para produtos agrícolas por estar

compreendido entre os valores de 12 e 110 kJ mol⁻¹ (Jangam et al., 2010). Quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade da água no produto.

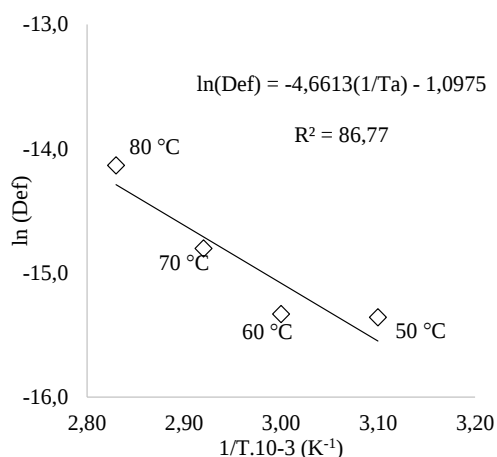


Figura 5. Representação do modelo de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura.

Tabela 4. Modelo ajustado de Arrhenius pelo coeficiente de difusão efetivo (Def) e temperaturas absolutas do ar de secagem (Ta) (323, 333, 343 e 353 K).

Modelo	R ² (%)	P (%)	DQM (%)
$De_f=4,30.10^{-1}.exp(-39,472/R.T_a)$	87,29	0,2898	5

No tocante às propriedades termodinâmicas determinadas, após o ajuste do modelo de Arrhenius, é possível verificar que a entalpia (ΔH) reduziu de 36,786 para 36,537 kJ mol⁻¹ com o aumento da temperatura (50, 60, 70 e 80 °C). Tal ocorrido indica a necessidade de menos energia para remover a água ligada ao produto durante a secagem, conforme constatado por Corrêa et al. (2010). O valor obtido da entropia (ΔS) foi de -0,0608 a -0,06153 kJ mol⁻¹ para as temperaturas avaliadas (Tabela 5). Para Telis-Romero et al. (2005) a entropia decresce com o

aumento da temperatura indicando a redução da excitação das moléculas de água.

Os valores da energia livre de Gibbs (ΔG) aumentaram (56,4216; 57,0307; 57,6424 e 58,2565 kJ mol⁻¹), com a elevação da temperatura (50, 60, 70 e 80 °C), respectivamente (Tabela 5). Este fato indica que o processo de secagem não foi espontâneo, sendo necessária a adição de uma energia proveniente do ar em que o produto esteve envolvido, para que ocorresse a redução da umidade, também citado por Jideane e Mptokawana (2009).

Tabela 5. Propriedades termodinâmicas, entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) obtidas pela cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

T (°C)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
50	36,7868	-0,0608	56,4216
60	36,7036	-0,0610	57,0307
70	36,6205	-0,0613	57,6424
80	36,5373	-0,0615	58,2565
Equação	$\Delta H = -8,314.Ta + 37202$	$\Delta S = -0,0246.Ta - 59,562$	$\Delta G = 61,164.Ta + 53362$
R ² (%)	99,99	99,98	99,99

CONCLUSÃO

1. O modelo matemático proposto por Wang e Sing é, dentre aqueles que foram testados, o que apresenta melhor ajuste estatísticos aos dados experimentais da cinética de secagem, sendo selecionado para a representação da secagem da polpa de abacate em camada de espuma.
2. O aumento da temperatura do ar de secagem promoveu redução no tempo necessário para a remoção de água da polpa de abacate em camada de espuma.
3. Para as temperaturas estudadas houve aumento do coeficiente de difusão efetivo com a elevação da temperatura do ar de secagem, e esta relação pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresentou energia de ativação para a difusão líquida, durante a secagem, de 39,472 kJ mol⁻¹.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. T. DE E. et al. 2014. Instruções Agrícolas para as Principais Culturas Econômicas. **Instituto Agronômico de Campinas**, n. 7, p. 452,
- ALVES, S. B. 2010. **ESTUDO EXPERIMENTAL DA CINÉTICA DE SECAGEM DO ABACATE (Persea americana Mill .)**. [s.l: s.n.].
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. 2016. **Official methods of analysis**. 20. ed. [s.l: s.n.]. v. 1
- BAPTESTINI, F. M. et al. 2015. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1203–1208.
- BREDA, C. A.; JUSTI, P. N.; SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J. 2013. EFEITO DA DESIDRATAÇÃO FOAM MAT NA RETENÇÃO DA VITAMINA C DA POLPA DE CAJAMANGA. **Alimentos e Nutrição = Brazilian Journal of Food and Nutrition**, v. 24, n. 3, p. 189–193.
- CEYLAN, İ.; AKTAŞ, M.; DOĞAN, H. 2007. Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 11-12, p. 1931–1936.
- COLESTINO, S. M. C. 2010. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Princípios de secagem de alimentos**. 50pp.
- CORRÊA, P. C. et al. , 2010. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595–601.
- COSTA, L. M. et al. 2015. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Biosci. J**, v. 31, n. 2, p. 392–403.
- DANTAS, S. C. DE M. 2010. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**.

[s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

- FERREIRA, L. F. D. et al. 2012. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 855–862.
- FURTADO, G. et al. 2010. Secagem De Polpa De Ceriguela Pelo Método De Camada De Espuma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 1, p. 9–14.
- GONELI, A. L. D. et al. 2014. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa agropecuária tropical**, v. 44, n. 1, p. 56–64.
- MARTINAZZO, A. P. et al. 2007. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301–306.
- MELO, K. DOS S. et al. 2013. Secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru: experimentação e ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 2, p. 10–17.
- MENEZES, M. L. DE et al. 2013. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, v. 15, n. 2, p. 176–186.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513–518.
- RESENDE, O. et al. 2008. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. pp. 17 – 26.
- RODOVALHO, R. S. 2014. **Isotermas de sorção e cinética de secagem dos grãos de pimenta bode (*Capsicum chinense* L. Jacquin)**. [s.l: s.n.].
- SILVA, A. S. et al. 2008. Desidratação da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1899–1905.
- SOUSA, F. C. DE et al. 2011. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpas de oiti. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 26, n. 2, p. 108–112.
- SOUZA, V. C. 2011. Efeito da liofilização e desidratação em leito de espuma sobre a qualidade do pó de polpa de cupuaçu. p. 78.
- TELIS-ROMERO, J. et al. 2005. Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 297–303.