

Estudo Da Modelagem Matemática Da Polpa De Graviola Mediante O Processo Foam Mat

Study of Mathematical Modeling in Drying of Graviola Pulp in Foam Bed

DOI:10.34117/bjdv7n3-768

Recebimento dos originais: 29/02/2021

Aceitação para publicação: 29/03/2021

Yohanne Sunally Medeiros Souto De Assis

Graduada em Engenharia de Alimentos, campus de Pombal, CCTA, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. Rua Jairo Vieira Feitosa.

E-mail: yohmedeiros@gmail.com

Georgiana Maria Vasconcelos Martins

Professora da Unidade Acadêmica de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Pombal, CCTA. Endereço Rua Jairo Vieira Feitosa,

E-mail: georgiana.82@gmail.com

Morgana Fabíola Cunha Silva Canuto

Professora da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Sumé, CCDS.

Endereço: Rua Luiz Grande, S/N

E-mail: morganafabiola@hotmail.com

Severina de Sousa

Professora da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande Instituição: Universidade Federal de Campina Grande Endereço:

Rua Aprígio Veloso,882 - Universitário, Campina Grande- PB, Brasil

E-mail: sevsousa@gmail.com

Josiane Dantas Costa

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande, CCT, UFCG. Rua Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande- PB, Brasil

E-mail: josianeeq@gmail.com

Bruna Lorrane Rosendo Martins

Graduanda em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Pombal, UFCG. Endereço Rua Jairo Vieira Feitosa

E-mail: brunalorrnerosendomartins@gmail.com

RESUMO

Os maiores problemas que envolvem as frutas e perecíveis em geral, estão relacionados com o armazenamento e determinação de ponto de maturação. O processo de secagem vem sendo empregado para redução de teores de água de produtos alimentícios, dificultando o crescimento microbiano, reações químicas e bioquímicas e facilitando o seu armazenamento. A secagem em camada de espuma (foam-mat) é um processo no qual alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas

estáveis através da incorporação de agentes espumantes, para posteriormente, serem submetidos à desidratação.

Este trabalho teve por objetivo realizar o estudo da modelagem matemática e propriedades termodinâmicas na secagem da polpa de graviola em leito de espuma, para as condições de temperaturas 50°C, 60°C e 70°C utilizando estufa com circulação de ar. Após coletados os dados de secagem, foram analisados pelos modelos matemáticos de Logarítmico, Page, Henderson e Pabis, Aproximação da Difusão de Midilli et al. (2002). O modelo que mais se ajustou aos dados experimentais foi o de Page e o segundo melhor foi o de Midilli et al. (2002) por apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2) e o menor erro médio estimado descrevendo satisfatoriamente a cinética de secagem estudada. A temperatura foi o fator controlador principal do processo. Observou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem provocou a elevação das taxas de remoção de água do produto, levando menos tempo para a polpa atingir o seu equilíbrio termodinâmico, e conseqüentemente, a polpa levou menos tempo para atingir o seu equilíbrio termodinâmico.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Cinética de secagem, Polpa de graviola.

ABSTRACT

The major problems involving fruits and perishables in general are related to the storage and determination of maturation point. The drying process has been used to reduce the water content of food products, hindering microbial growth, chemical and biochemical reactions and facilitating its storage. Foam-mat drying is a process in which liquid or semi-liquid feeds are transformed into stable foams by the incorporation of foaming agents and subsequently subjected to dehydration. The objective of this work was to study the mathematical modeling and thermodynamic properties in the drying of the graviola pulp in the foam bed, for the conditions of temperatures 50 ° C, 60 ° C and 70 ° C using air circulating greenhouse. After the drying data were collected, they were analyzed by the mathematical models of Logarithm, Page, Henderson and Pabis, Midilli et al. (2002) Diffusion Approximation. The model that best fit the experimental data was Page and the second best was Midilli et al. (2002) for presenting the best determination coefficient (R^2) and the lowest estimated average error describing satisfactorily the drying kinetics studied. Temperature was the main controlling factor of the process. It was observed that increasing the temperature of the drying air caused the water removal rates of the product to increase, taking less time for the pulp to reach its thermodynamic equilibrium, and consequently the pulp took less time to reach its thermodynamic equilibrium.

Keywords: Mathematical modeling, Drying kinetics, Graviola pulp

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, segundo produtor mundial de graviola, por ser um país continental dotado de uma ampla variedade de clima e solos, é capaz de produzir volumes de diversas espécies frutícolas, desde as de clima tropical até aquelas que necessitam de clima temperado para seu cultivo (FAO, 2005).

A gravioleira (*Annona muricata* L.), pertencente à família Annonaceae, é uma planta tipicamente tropical. Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, esta fruteira está presente na maioria das pequenas propriedades rurais como um componente da economia familiar e não como cultivo em larga escala. Seus frutos são utilizados na fabricação de sucos, sorvetes, compotas, geléias e doces. Sua origem não está bem definida, sendo encontrada desde o Caribe ao sudeste do México e Brasil. Cavalcante et al (1991), descreve como origem mais provável as Antilhas, onde gravioleiras foram encontradas em estado silvestre.

Os maiores problemas que envolvem as frutas e perecíveis em geral, estão relacionados com o armazenamento e com a determinação de ponto de maturação. No primeiro caso, é necessário a determinação de parâmetros específicos do produto a ser estocado, para se obter a carga térmica total a ser retirada, e assim efetuar um armazenamento refrigerado adequado. No segundo caso, não se sabe ao certo em que estágio da maturação ocorrem determinados teores de sólidos dos solúveis, de acidez e algumas propriedades sensoriais, cujos valores são exigidos para a industrialização e para a exportação (SILVA et al, 1999).

Dentre as técnicas empregadas para a manutenção da qualidade pós-colheita de frutas, a desidratação, é um importante método capaz de prolongar a vida útil e impedir a deterioração e perda do valor comercial de frutas e hortaliças (GURJÃO et al, 2006). Dentre elas destacam-se a liofilização (VIEIRA et al., 2011), desidratação pelo processo *foam-mat* (FRANCO et al., 2015), encapsulação de sucos por co-cristalização com sacarose, secagem por atomização secagem em leito de jorro (MACHADO et al., 2015).

A secagem em camada de espuma (*foam-mat*) é um processo no qual alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas estáveis através da incorporação de agentes espumantes, para posteriormente, serem submetidos à desidratação (KARIN; WAI, 1999). A secagem em camada de espuma é uma técnica que requer menores temperaturas e tempo de secagem, devido à maior área de superfície exposta ao ar aquecido, acelerando desta forma o processo de remoção da água e obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação (RAJKUMAR et al., 2007).

O método de desidratação em camada de espuma é aplicado a vários produtos alimentícios dentre eles pode-se destacar: tomate, graviola, cajá-manga, seriguela, microalgas verdes, maracujá, entre outros (KADAM et al. 2012, SOUSA et. al. 2020).

O estudo e a modelagem matemática da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos agrícolas (FARIA et

al. 2012). Na literatura, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos: jujuba chinesa (Yi et al. 2012), castanha (Delgado et al., 2014), manga (Corso, Álvarez, 2012), broto de palma forrageira (Martins et al. 2014), banana verde (Costa, Silva, Martins, 2015), grãos de feijão guandu (Silva et al. 2015), morango (Oliveira et al. 2015), maracujá (SOUSA et al. 2020). dentre outros.

A obtenção e modelagem das curvas de secagem de um determinado produto possibilitam determinar índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, que são fundamentais para o dimensionamento adequado de toda a estrutura utilizada para a secagem (BOTELHO et al., 2015).

Diferentes trabalhos envolvendo a secagem de graviola foram realizados nos últimos anos envolvendo secagem.

A pesquisa de GURGEL et al., (2014) estudaram a desidratação da polpa de graviola com e sem adição de leite e aditivos (1% de Liga Neutra e 1% de Emustab) pelo processo *foam-mat*. Analisaram os efeitos da temperatura, espessura da camada e concentração de leite na cinética de secagem, podendo verificar que a adição do leite e temperaturas mais elevadas aumentaram as taxas e diminuíram o tempo de secagem e que maiores espessuras da camada de espuma foram desfavoráveis ao processo.

Enquanto que os estudos realizados por Dieb et al., (2015) avaliaram o comportamento das curvas de secagem da polpa de graviola e as características físico-químicas do produto em pó (umidade e atividade de água). Iogurtes saborizados com 7% de pó de graviola obtidos na secagem sob efeitos da temperatura (50°C, 60°C e 70°C) e espessura da camada (0,30cm, 0,45cm e 0,60cm) na cinética de secagem, foram submetidos à análise sensorial. O produto apresentou índice de aceitabilidade superior a 70% e conforme a classificação qualitativa, as médias das notas ficaram compreendidas entre gostar ligeiramente e regularmente.

Já os estudos realizados por Baptestini et al., (2015) estudaram os ajustes matemáticos ao processo de secagem de espuma de graviola em diferentes condições de ar, determinar o coeficiente de difusão efetivo e obter a energia de ativação. O modelo para determinar o binômio teor de água crítico, tempo crítico e o de Midilli se ajustaram bem aos dados experimentais da secagem de espuma de graviola obtendo-se acréscimo no coeficiente de difusão efetivo com a elevação da temperatura de secagem e energia de ativação de 33,10 KJ mol⁻¹.

Considerando a importância do estudo da secagem de polpas de frutas e a limitação de informações a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem da polpa de graviola, objetivou-se neste trabalho ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem, selecionando aquele que melhor represente o fenômeno.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada nos Laboratórios de Sementes e Fisiologia Vegetal do Centro de Ciências e Tecnologia de Alimentos (CCTA), da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Pombal, Paraíba, Brasil.

2.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA A GRAVIOLA

O processo de secagem em camada de espuma da polpa de graviola foi realizado seguindo as etapas observadas no fluxograma da Figura 1.

Figura 1. Fluxograma do Processo de secagem em camada de espuma da polpa de graviola



3 MATRIZ EXPERIMENTAL DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 1, apresenta a matriz de planejamento fatorial 2^2 , totalizando em sete experimentos, dentre os quais quatro ensaios distintos e mais três no ponto central, que são três ensaios idênticos com uma das finalidades de verificar a reprodução dos ensaios.

A faixa de temperatura foi escolhida com base em dados existentes na literatura, que inclui valores entre 35°C e 90°C . (Dantas, 2010 e Gurgel et al. 2014). Foram escolhidas as temperaturas de 50°C , 60°C e 70°C como variáveis de entrada.

Tabela 1. Matriz do Planejamento completo 2² +3 para secagem em camada de espuma da polpa da graviola

Ensaio	Temperatura Codificada	Concentração Codificada	Temperatura (°C)	Concentração de emulsificante (g)
1	-1	-1	50	1,7
2	+1	-1	70	1,7
3	-1	+1	50	3,00
4	+1	+1	70	3,00
5	0	0	60	2,35
6	0	0	60	2,35
7	0	0	60	2,35

A cinética de secagem em camada de espuma da polpa da graviola em estufa com circulação e renovação de ar, marca Solab, foi avaliada nas temperaturas de 50°C e 70°C em três concentrações de emulsificantes de 1,7g, 2,35 e 3g a base de sacarose, monoglicerídeo destilado, éster de glicerol, estereato de potássio em glicerol e propileno glicol (Aditivo). O teor de água de equilíbrio foi considerado, como o teor de água alcançada ao se atingir massa constante, para cada conjunto de dados experimentais, seguindo a metodologia de GURGEL et al. (2014).

Para o desenvolvimento do processo foam mat da graviola foram utilizadas polpas pasteurizadas de graviola da marca Doce Mel[®], adquiridas no mercado local, localizado na cidade de Pombal. O produto foi obtido na forma congelada em embalagens plásticas constituídas de polietileno de 100 g.

As polpas foram levadas para o laboratório em caixas térmicas e mantidas sob congelamento até utilização.

As densidades da polpa de graviola e da sua espuma foram determinadas por picnometria, utilizando-se picnômetros de 50mL previamente calibrados. Para o cálculo da densidade da polpa de graviola e da sua espuma empregou-se a seguinte equação (1):

$$\rho_{amostra} = \frac{m_{amostra}}{V_{picnometro}} \quad (1)$$

A expansão das espumas será calculada a partir da equação:

$$Exp (\%) = \frac{1/\rho_{espuma} - 1/\rho_{polpa}}{1/\rho_{polpa}} \times 100 \quad (2)$$

em que:

$\rho_{amostra}$ - densidade da amostra (gcm⁻³ ou g/cm³)

$m_{amostra}$ - massa da amostra (g)

$V_{picnometro}$ - volume do picnômetro (cm³)

Exp - expansão da espuma (%)

ρ_{polpa} - densidade da polpa (g/cm^3)
 ρ_{espuma} - densidade da espuma (cm^3)

De acordo com Arsdel (1964), a densidade das espumas deve estar compreendida numa faixa de 0,1 a 0,6 g/cm^3 .

Na preparação das espumas a polpa foi descongelada e pesada, adicionando os emulsificantes nas proporções mencionadas na matriz experimental, a mistura de polpa e emulsificante foi submetida a agitação por 20 minutos em batedeira doméstica Arno®, Modelo Facilita de 250W, na velocidade média do equipamento.

As formulações da matriz experimental foram dispostas em bandejas de formato circular e colocadas em estufa com circulação de ar.

As espumas da polpa da graviola foram desidratadas em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C. A perda de água foi acompanhada através da variação da massa das bandejas de circular de raio 26 cm, ao longo da secagem, até que fosse observado massa constante.

As pesagens das amostras foram realizadas por meio de uma balança semi-analítica marca Marte - UX4200H com precisão de 0,01g. A porcentagem de teor de água foi calculada em base úmida aplicando-se a equação (3):

$$\text{Teor de água (\%)} = \frac{(M_i - M_f)}{(M_f - t)} \cdot 100 \quad (3)$$

em que:

M_i - massa inicial, (g)
 M_f - massa final, (g)
 t - tara, massa da bandeja

O produto desidratado (pó) foi retirado das bandejas, mediante uma raspagem, apresentando granulometria fina, mas não homogênea. Após a raspagem o produto final foi acondicionado em sacos de polietileno.

4 METODOLOGIA DA CINÉTICA DE SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA DA POLPA DE GRAVIOLA

As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados experimentais referentes à perda de água no parâmetro adimensional razão de teor de água (RX). Para

determinação da razão de teor de água da polpa da graviola para as diferentes condições de secagem será utilizada a seguinte equação:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (4)$$

RX - Razão de teor de água adimensional; X – teor de água absoluta, Xo - teor de água inicial, e Xe - teor de equilíbrio.

Tabela 2. Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos alimentícios. Em que: t é o tempo de secagem, s; k, k₀ e k₁ são as constantes de secagem – a mesma não apresenta unidade (adimensional)

Designação dos Modelos	Modelos Matemáticos	Enumeração das Equações
Page	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	(5)
Henderson & Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(6)
Logarítmico	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(7)
Aproximação da Difusão	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(8)
Midilli et al. (2002)	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(9)

A análise e a representação dos dados experimentais do processo de secagem da graviola, polpa de caqui e polpa de goiaba foram realizadas utilizando-se os modelos matemáticos apresentados na Tabela 2. Os parâmetros dos modelos da polpa da graviola foram obtidos mediante aplicação dos dados experimentais ao pacote de análise utilizando-se a análise de regressão não linear, pelo método Levenberg - Marquardt, com 1000 iterações e critério de convergência 1×10^{-6} empregando se o programa computacional Statistica 7.0®.

Os critérios usados para determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais das polpas de graviola foram: coeficiente de determinação (R²) e desvio quadrático médio (DQM).

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{exp} - RX_{pred})^2}{N}} \quad (7)$$

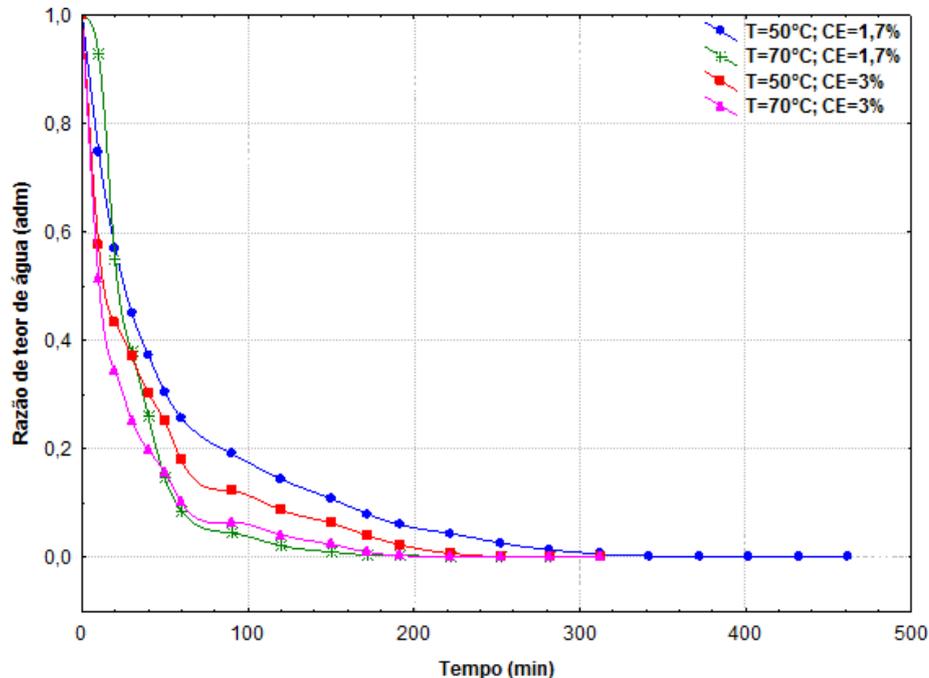
em que,

RX_{exp} - valor observado experimentalmente; RX_{pred} - valor estimado pelo modelo; N é o número de observações experimentais

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 e 3 contêm os dados experimentais da cinética de secagem de polpa de graviola em camada fina em função do tempo de secagem.

Figura 2. Cinética de secagem da polpa da graviola nas temperaturas de 50°C e 70°C e concentração de emulsificante de 1,7 % e 3%



A cinética de secagem da graviola, em camada fina, foi avaliada nesse presente estudo, afim de analisar a influência das variáveis de processo: temperatura de secagem e concentração de emulsificante em relação a cinética de secagem.

Na temperatura de 50°C, podemos observar que se levou mais tempo para se extrair a água do produto, quando comparadas com as temperaturas mais elevadas de 60°C e 70°C que levaram tempos inferiores de secagem.

Através das curvas da razão de teor de água em função do tempo observou-se que com o aumento da temperatura do ar de secagem, favoreceu na elevação das taxas de remoção de água do produto, diminuindo o tempo para a polpa atingir o equilíbrio. Esses resultados se encontram em estudos de diversos autores que avaliaram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro que exerce maior influência na cinética de secagem de alimentos, dentre eles: ALMEIDA et al. (2006), LEITE et al. (2015) e SILVA et al. (2016) que trabalharam secagem de acerola, banana da terra e polpa de carambola, respectivamente.

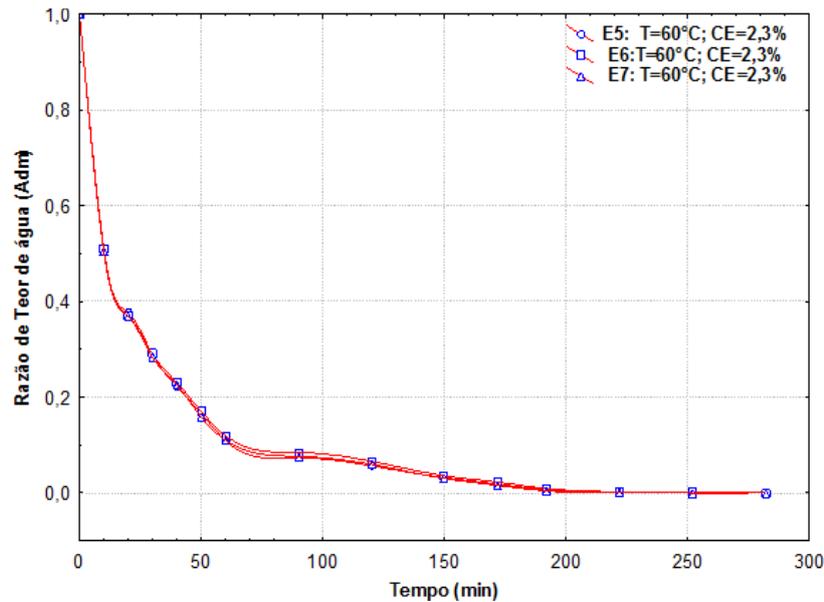
Os resultados de DANTAS, et al. (2010) avaliaram que o efeito da temperatura (60°C e 70°C) mediante a cinética de secagem através do leite de espuma de abacaxi e manga, avaliando-se o comportamento das curvas de secagem e ajustando-se aos modelos matemáticos. As condições que mais favoreceram as melhores taxas de secagem foi a temperatura de 70°C para ambos os frutos e o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais podendo ser utilizado para fins preditos.

Enquanto que na pesquisa de Gurgel et al. (2015) durante a secagem em leite de espuma da polpa de graviola, com adição de 1% de emulstab e 1% de liga neutra. Nos seus estudos avaliou-se os efeitos das temperaturas (50°C , 60°C e 70°C), espessuras da camada (0,30 cm, 0,45 cm e 0,60 cm) e concentração de leite (0%, 20% e 40%), em relação a cinética de secagem, avaliando-se o comportamento das curvas e as características do físico-químicas.

Os resultados obtidos evidenciaram que a graviola em pó não sofreram alterações importantes mediante o processo de leite de espuma. Percebe-se para todas as condições avaliadas que as espumas secaram muito rápido no início do processo, sendo possível visualizar em todas as curvas um importante período de taxa constante. O tempo de secagem para atingir a condição de equilíbrio foi bastante reduzido em função da temperatura, concentração de leite e espessura da camada de espuma. O maior tempo de secagem para atingir o equilíbrio foi de 515 minutos para a temperatura de 50°C e espessura de 0,6 cm sem adição do leite. O menor tempo para atingir o equilíbrio foi 60 minutos para a temperatura de 70°C e espessura de 0,3cm, com adição de 40% de leite. O modelo matemático de Page foi utilizado para a estimativa desse tempo.

A Figura 3 apresenta as curvas da secagem de polpa de graviola para os experimentos relacionados ao ponto central da matriz de planejamento experimental, referentes a cinética de secagem há uma temperatura de 60°C e concentração de emulsificante 2,3%, verifica-se uma boa reprodutibilidade dos três ensaios para as condições avaliadas.

Figura 3. Cinética de secagem da polpa da graviola na temperatura de 60°C e concentração de emulsificante de 2,3% para as três repetições da matriz experimental



6 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM DA POLPA DA GRAVIOLA

As Figuras 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam as curvas experimentais das cinéticas de secagem da polpa de graviola, na forma adimensional de água (Razão de água) em função do tempo pelo modelo Logaritmo, Page, Henderson e Pabis, aproximação da Difusão e Midilli et al. (2002), respectivamente, da matriz experimental.

Figura 4. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Logarítmico para os 7 ensaios da matriz experimental

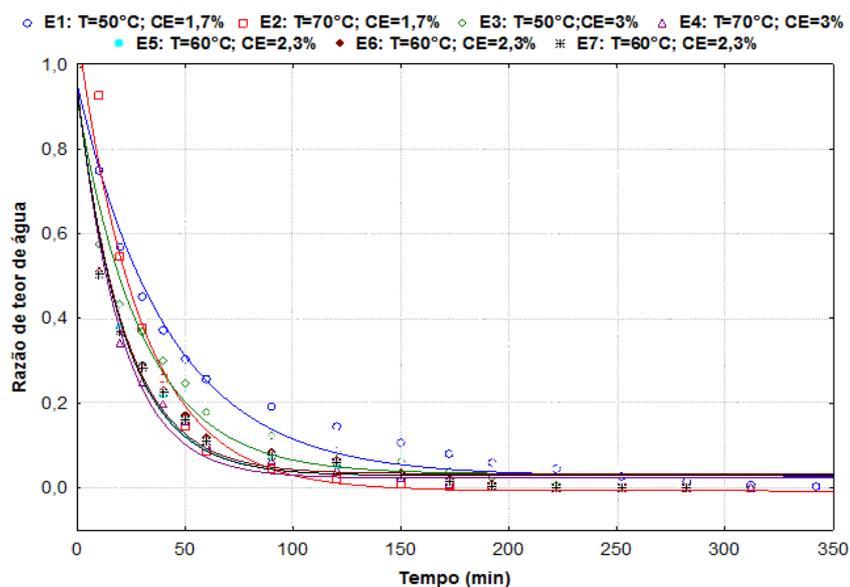


Figura 5. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Page para os 7 ensaios da matriz experimental

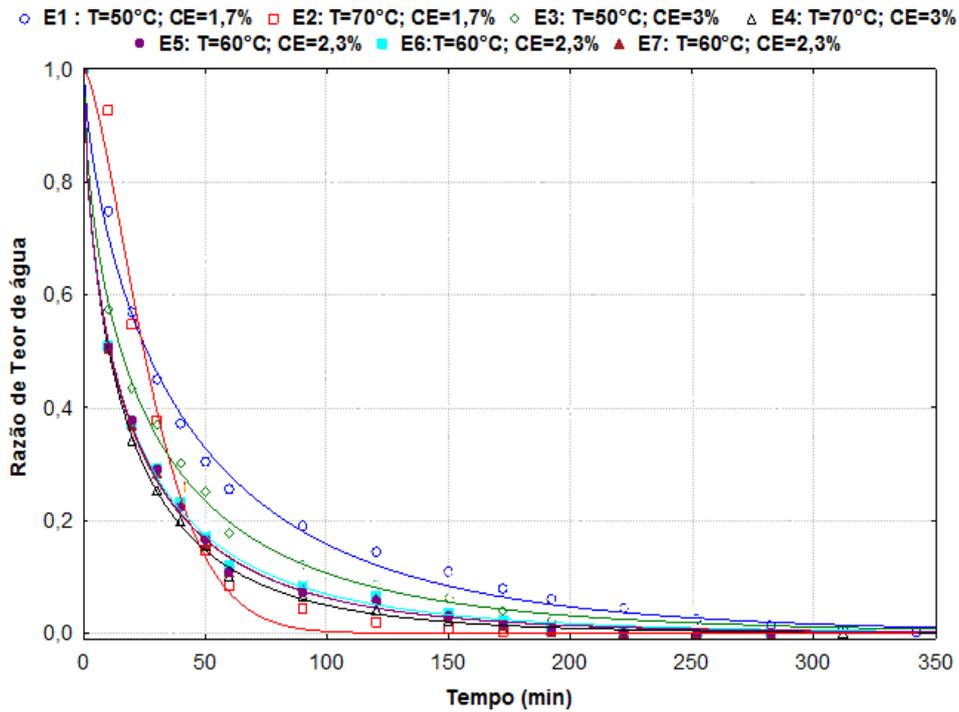


Figura 6- Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Henderson & Pabis para os 7 ensaios da matriz experimental

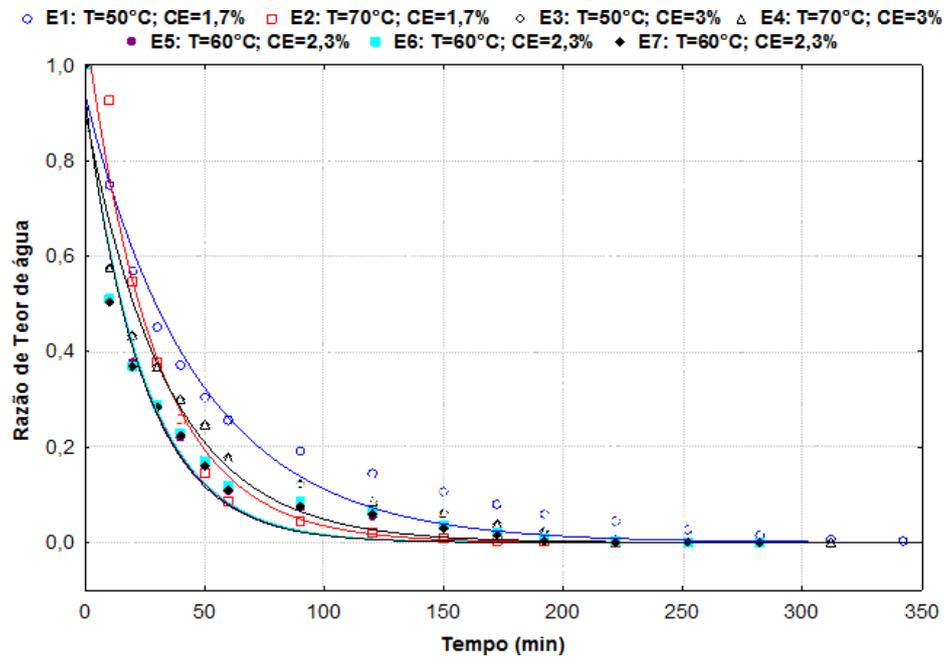


Figura 7. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Aproximação da Difusão para os 7 ensaios da matriz experimental.

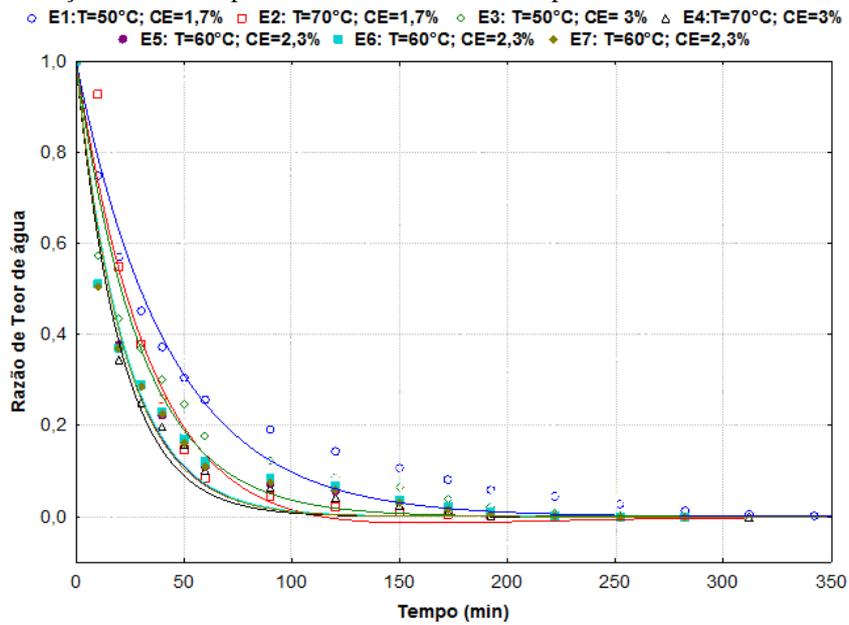
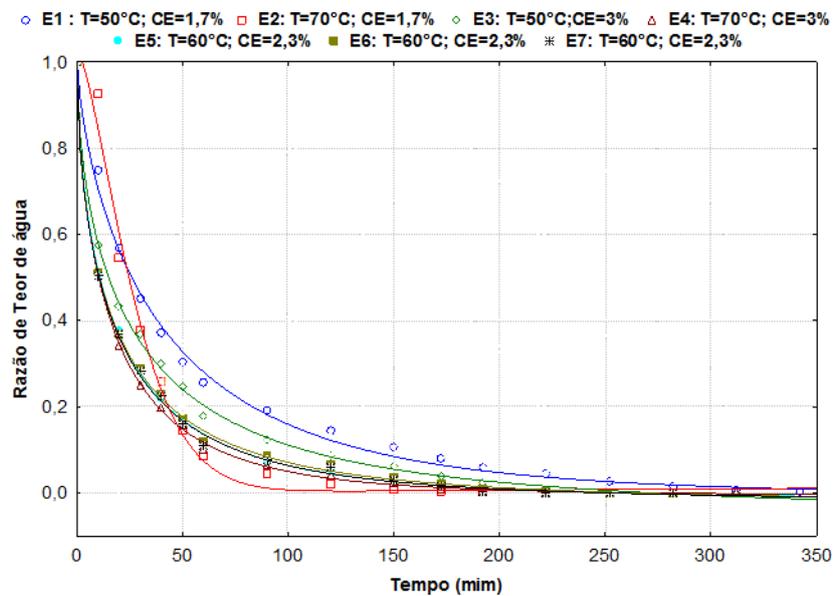


Figura 8. Curvas dos dados experimentais da razão de teor de água da polpa da graviola e calculados pelo modelo Midilli et al. (2002) para os 7 ensaios da matriz experimental



Nas Tabelas de 3 a 7 são apresentados os valores dos parâmetros, coeficiente de determinação (R^2) e os desvios quadráticos (DQM) dos modelos matemáticos de Logaritmo, Page, Henderson e Pabis, aproximação da Difusão e Midilli e Kucuk, ajustados aos dados de secagem da polpa de graviola em camada de espuma para as condições de secagem estudadas.

Tabela 3. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Logaritmo aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola

Modelo Logaritmo					
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$					
Parâmetros					
Ensaio	a	K	B	R^2	DQM
1	0,9279	0,0236	0,0278	98,67	0,0314
2	1,0939	0,0338	-0,00744	97,69	0,0499
3	0,890840	0,032981	0,032557	97,26	0,0438
4	0,933052	0,049157	0,022865	98,22	0,0345
5	0,916944	0,045200	0,028318	97,76	0,0394
6	0,910844	0,045311	0,033230	97,49	0,0415
7	0,916519	0,045987	0,02889	97,64	0,0403

Tabela 4. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Page aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola

Modelo Page (1949)				
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$				
Parâmetros				
Ensaio	k	n	R^2	DQM
1	0,0641	0,7297	99,67	0,0131
2	0,0053	1,5154	99,12	0,0061
3	0,1228	0,6307	99,76	0,0108
4	0,1503	0,6503	99,94	0,0061
5	0,1505	0,6323	99,83	0,0108
6	0,1601	0,6110	99,86	0,0099
7	0,1559	0,6249	99,83	0,0109

Tabela 5. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Henderson & Pabis aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola

Modelo Henderson & Pabis (1961)				
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$				
Parâmetros				
Ensaio	a	k	R^2	DQM
1	0,9382	0,0213	98,16	0,0369
2	1,0879	0,0344	97,67	0,0501
3	0,9061	0,0292	96,61	0,0488
4	0,9456	0,0452	97,80	0,0015
5	0,9323	0,0407	97,20	0,0426
6	0,9279	0,03998	96,72	0,0459
7	0,9319	0,0413	97,05	0,0451

Tabela 6. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Aproximação da Difusão aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola

Modelo Aproximação da Difusão					
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$					
Parâmetros					
Ensaio	a	k	b	R^2	DQM
1	3,3535	0,0233	0,9999	97,83	0,0401
2	20,70397	0,02117	0,97947	97,34	0,0536
3	4,8084	0,033197	0,9999	97,66	0,0552
4	4,5809	0,0482	0,9999	97,50	0,0409
5	1,2896	0,0442	0,9996	96,71	0,0477

6	2,3821	0,0437	0,9999	96,16	0,0512
7	1,9276	0,0449	1,0001	96,56	0,0487

Tabela 7. Valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM), obtidos pela aplicação do modelo de Midilli aos dados experimentais de secagem de polpa de graviola

Modelo Midilli et al. (2002)						
Parâmetros						
Ensaio	a	k	n	b	R^2	DQM
1	1,0115	0,0682	0,7161	$-0,9 \times 10^{-5}$	99,68	0,0153
2	1,0295	0,0066	1,4636	$3,1 \times 10^{-5}$	99,20	0,0293
3	0,9987	0,1363	0,5966	$-7,6 \times 10^{-5}$	99,85	0,0101
4	1,0003	0,1531	0,6441	$-1,3 \times 10^{-5}$	99,20	0,0058
5	0,9990	0,1563	0,6193	$-3,1 \times 10^{-5}$	99,85	0,0102
6	0,9997	0,1681	0,5944	$-3,7 \times 10^{-5}$	99,88	0,0090
7	0,9992	0,1629	0,6097	$-3,5 \times 10^{-5}$	99,85	0,0101

Algumas pesquisas foram realizadas para se averiguar a cinética de secagem de polpas de frutas tropicais mediante o processo em camada de espuma.

Os estudos realizados por DANTAS, et al. (2010), testou dois modelos empíricos para descrever a cinética de secagem das polpas de manga e abacaxi em leito de espuma, verificou-se que o modelo de Page ajustou-se aos dados experimentais de forma mais satisfatória com maiores coeficientes de determinação e menores erros relativos.

Resultados semelhantes foram avaliados nos estudos de PEREZ et al, (2013) utilizando os modelos de Page e Midilli et al. (2002) para os ajustes da curva de secagem da polpa de cupuaçu verificou que o modelo de Page se ajustou bem aos dados experimentais de secagem, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99% e erros percentuais médios (P) inferiores a 8,5% podendo ser usados na predição da cinética de secagem da polpa de cupuaçu.

Também foi observado, nos estudos realizados por FURTADO et al, (2010), ao ajustar o modelo de Page, Henderson e Pabis e Midilli et al. (2002) as curvas de secagem da polpa de seriguela pelo método de camada de espuma, verificou que todos os modelos analisados apresentaram ajustes com elevados coeficientes de determinação e baixo erro médio estimado. Nesse caso o modelo de Midilli et al. (2002) foi o que melhor se ajustou aos dados observados, nas diferentes temperaturas de secagem, por apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2) e o menor erro médio estimado (SE).

Já nos estudos realizados por SILVA et al. (2016), ao estudar a cinética de secagem de polpa de carambola para realizar a caracterização das curvas de secagem pelos modelos de Aproximação da difusão, Dois termos, Henderson & Pabis, Henderson & Pabis modificado, Lewis, Logarítmico, Midilli et al. (2002), Thompson. Os resultados

de Silva et al. (2016) evidenciou que o modelo de Midilli et al. (2002) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais por apresentar menores desvios padrão da estimativa (SE).

Em contraponto, os estudos realizados por Alves e Rodovalho (2016) da cinética de secagem do abacate em leito de espuma mostraram que 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. Também seus resultados evidenciaram que 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.

Finalmente, nos estudos realizados por Sousa et al. (2020) da cinética de secagem em camada de espuma da polpa do maracujá verificou-se que os modelos de midilli et al. (2002) e de Cavalcanti Mata et al. (2006) foram os melhores para representar a cinética de secagem do maracujá.

7 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos pode-se concluir que o modelo de Page (1949) e Midilli et al. (2002) foram os melhores que se ajustaram a cinética de secagem da polpa de graviola em camada de espuma por apresentar o melhor coeficiente de determinação (R^2) e o menores desvio quadrático médio.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos responsáveis do Laboratórios de Sementes e Fisiologia Vegetal do Centro de Ciências e Tecnologia de Alimentos (CCTA), da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Pombal, Paraíba, Brasil, por cederem o espaço físico para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. A. et al. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v.6, n.1, p.145-151, 2006.

Alves, J.J. L; Rodovalho, R. S. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate cv ‘ Quintal’ (Persea americana Mill). Revista Agrotecnologia, Ipameri, v.6, n.1, p.86-99, 2016 doi: 10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v7n1p86-98

BAPTESTINI, F.M. et al. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Rev. bras. Eng. agríc. Ambient.** vol.19, n.12, p.1203-1208, 2015.

BOTELHO, H.H.V.; PESSOA, G.O.; ROCHA, L.G.P.; YESTE, M. Hormone supplementation protocol using estradiol benzoate and long-acting progesterone is efficient in maintaining pregnancy of anovulatory recipient mares during autumn transitional phase. Animal Reproduction Science, p.39-43, 2015.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport, The Avi Publishing Company. p.450, 1992.

Carolina Fontes de Sousa; Severina de Sousa; Joyce Salviano Barros de Figueiredo; Maria Rayanne Lima de Moraes; Izis Palilla Pereira de Sena Carvalho; Filipe José Ferreira Chaves; Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata, Glauber Nunes de Almeida. Cinética de secagem em camada de espuma de polpa de maracujá, utilizando diferentes aditivos. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v.6, n.9, p.70821- 70829, 2020.

CAVALCANTE, P.B. Frutas comestíveis da Amazônia. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, p.279, 1991.

CORRÊA, P.C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010

DANTAS. S. C. M. et al. Desidratação de polpas de Frutas pelo método *foam-mat*. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos. Natal/RN, 2010.

C. E. M. R.GURGEL; J.T. DIEB; A. K. T. MACHADO; M. F. D. MEDEIROS; MACHADO, A.K.T.; MEDEIROS, M. F. D. Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma: avaliação dos parâmetros de secagem. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos-SP, 2015.

FAO STATISTICS. Production and trade – Castor beans. 2005. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/pt/>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

FELLOWS, P.J. Tecnologia do processamento de alimentos: Princípios e prática. Porto Alegre: Artmed, p. 602, 2006.

FRANCO, B.D.G.M.; LANDGRAF, M. *Microbiologia dos Alimentos*, Editora Atheneu. São Paulo/SP, p.182, 2015.

Furtado, G.F.; Silva, F.S.; Porto, A.G.; Santos, P. Secagem de polpa de seriguela pelo método de camada de espuma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, n.1, p.9-14, 2010.

GURGEL, C.E.M.R.; DIEB, J.T.; MACHADO, I.P.; DANTAS, T.N.P.; CORREIA, T.P.; MEDEIROS, M.F.D. Cinética de secagem da polpa de graviola pelo processo *foam-mat*. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis/ SC, 2014.

GURJÃO, K.C.O. Desenvolvimento, armazenamento e secagem de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). Tese (Doutorado em agronomia) - Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Areia/PB. p.165, 2006.

J. T. DIEB. Secagem da polpa de graviola pelo processo foam-mat e avaliação sensorial do produto obtido. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Unicamp – Campinas – SP, 2015.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. modeling of water absorption of Botswana Bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, p.182-188, 2009.

LEITE, A. L. M. P. et al. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632015v4530270>.

MACHADO, I.P.; FERREIRA, A.E.S.; MACHADO, A.K.T.; DELMIRO, T.M.; MEDEIROS, M.F.D.; Secagem em leito de jorro da polpa de graviola com adição de leite. Efeito das variáveis de operação sobre a taxa de produção e umidade do pó. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo: Blucher, 2015.

MARTINS, G.M.V.; FERREIRA, J.P.L.; SANTOS, A.E.; NOBRE, R.S. Cinética de Secagem em Camada Fina da Polpa de Cladódios de Palma Forrageira em Estufa Com Circulação Forçada de Ar. In: **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. v.1, p.4185•4192, 2015.

MENGES, H. O.; ERTEKIN, C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 1, p. 119–125, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049>

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

PEREZ, L.G. et al. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 44, n. 1, p. 102-106, jan-mar, 2013. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G.S.V. Drying characteristic of foamed Alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p.1452-1459, 2007.

RAYAGURU, K.; ROUTRAY, W. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. *International Food Research Journal*. v. 19, n.4, p.1503- 1510, 2012.

SANTOS, P. et al. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana da variedade terra (*Musa sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 4, n. 2, p. 218-234, 2010.

SILVA, C.R.R.; FONSECA, E.B.A; MOREIRA, M.A. A cultura da Mangueira, 2000. Disponível em: <www.editora.ufla.br/Boletim/pdfextensao/bol_24.pdf>. Acesso em: 26 jul 2016.

SILVA, S.E.L; GARCIA, T.B. A cultura da gravioleira (*Annona muricata* L.). Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p.19, 1999.

Silva. R.B. et al. *Revista brasileira de Tecnologia Agroindustrial*. Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 2069-2080, jul. /dez. 2016.

TONON, R.V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Influence of dryng air temperature and carrier agent concentration on the physicochemical properties of acai juice powder. *Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas*, v. 2, n. 29, p. 444-450, 2009.

VIEIRA, L.M.; SOUSA, M.S.B.; MANCINI-FILHO, J.; LIMA, A. Fenólicos totais e capacidade antioxidante *in vitro* de polpas de frutos tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.33, n.3, p.888-897, 2011.