



## Utilização de soluções numéricas e analíticas na descrição da secagem do eixo central de jaca

### *Use of numerical and analytical solutions in the description of the drying of the central axis of jackfruit*

Hyago Costa de Sousa<sup>1</sup>, Nathan José Pereira da Silva<sup>2</sup>, Emmanuel Moreira Pereira<sup>3</sup>, Carlos Roberto Marinho da Silva Filho<sup>4</sup>, Weysser Felipe Cândido de Souza<sup>5</sup>

**Resumo:** Objetivou-se descrever o processo de secagem do eixo central de jaca por modelos matemáticos e determinar qual modelo matemático apresentou os melhores ajustes para as características avaliadas. Foi estudado a secagem do eixo central de jaca em estufa com circulação e renovação de ar em quatro temperaturas diferentes 50, 60 70 e 80 °C utilizando modelos matemáticos para a descrição da quantidade de água no eixo central de jaca, foram utilizados frutos adquiridos no pomar do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias, Bananeiras-PB pertencente a Universidade Federal da Paraíba. De acordo com a análise de dados o modelo de Page foi o que apresentou os melhores coeficientes de determinação e os melhores ajustes aos dados experimentais.

**Palavras-chave:** Modelos matemáticos, cinética de secagem, *Artocarpus heterophyllus*.

**Abstract:** This study aimed to describe the process of drying the central axis of jackfruit by mathematical models and determine which mathematical model presented the best fit for the characteristics. This study investigated the drying of the central axis of jackfruit in an oven with circulation and air exchange at four different temperatures 50, 60, 70 and 80 °C using mathematical models to describe the amount of water in the central axis of jackfruit, fruits were utilized acquired in orchard Humanities Center, Social and Agricultural, Bananeiras-PB belonging to the Federal University of Paraíba. According to the data analysis the Page model showed the best determination coefficients and the best fit to the experimental data.

**Key words:** Mathematical models, drying kinetics, *Artocarpus heterophyllus*.

\*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 21/06/2016; aprovado em 05/08/2016

<sup>1</sup>Graduando, Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras – PB; (83) 99654-7142, [hyagocosta\\_jp@hotmail.com](mailto:hyagocosta_jp@hotmail.com)

<sup>2</sup>Graduando, Universidade Federal da Paraíba, [nathan\\_jps@hotmail.com](mailto:nathan_jps@hotmail.com)

<sup>3</sup>Mestre, Universidade Federal da Paraíba, [emmanuel16mop@hotmail.com](mailto:emmanuel16mop@hotmail.com)

<sup>4</sup>Prof. Dr., Universidade Federal da Paraíba, [crmfilho@bol.com.br](mailto:crmfilho@bol.com.br)

<sup>5</sup>Graduando, Universidade Federal da Paraíba, [weysserfelipe.ufpb@hotmail.com](mailto:weysserfelipe.ufpb@hotmail.com)

## INTRODUÇÃO

A jaca (*Artocarpus heterophyllus* L.) pertence à família *Moraceae* e encontra-se largamente distribuída em países como a Tailândia, Indonésia, Índia, Filipinas e Malásia. Durante a safra, esta fruta representa uma opção de alimento saudável para compor a dieta de pessoas em Bangladesh (CHOWDHURY et al., 1997).

A jaqueira foi introduzida no Brasil pelos portugueses no século XVII e tornou-se comum nas regiões Norte e Nordeste, principalmente em áreas mais úmidas (VIEIRA NETO, 2002). Atualmente, é cultivada em toda a região Amazônica e toda a costa tropical brasileira, do Estado do Pará ao Rio de Janeiro. A jaca apresenta característica de sazonalidade bem específica, marcada pela concentração da oferta no período de dezembro/abril (SOUZA et al., 2009).

No nordeste brasileiro, particularmente no estado da Paraíba, não há dados oficiais de sua cultura, em razão deste fruto ser comercializado de forma informal; é notório, porém, que se trata de uma cultura de razoável escala, como pode ser observado, através da comercialização em feiras livres ou mesmo à beira-de-estradas, no estado (SILVEIRA, 2002).

A jaca possui diversas aplicações, que vão desde seu consumo como alimento propriamente dito, tanto da fruta verde quanto madura, até o aproveitamento de sua madeira, ou sua utilização como produto industrial e medicinal. É conhecido que esta fruta é rica em carboidratos, proteínas, fibras, potássio, cálcio, ferro e vitamina A B e C (SIDHU, 2012).

Para estocagem e comercialização de produtos agrícolas é necessário reduzir a quantidade de água do material e consequentemente sua atividade biológica; a secagem surge, então, como o processo mais utilizado para prolongar sua vida útil, por garantir estabilidade durante a armazenagem (Santos et al., 2013). De acordo com Andrade (2003), a redução do teor de água é obtida pela movimentação da água decorrente de uma diferença de pressão de vapor de água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. A condição para que um produto seja submetido ao processo de secagem é que a pressão de vapor sobre a superfície do produto ( $P_g$ ) seja maior que a pressão do vapor de água no ar ( $P^a$ ) de secagem.

De acordo com Athié et al. (1998), o processo de secagem pode envolver três meios de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por convecção é o meio mais utilizado na secagem comercial, em que um fluxo de ar aquecido passa através da camada do produto, de onde evapora para o ambiente. A eficiência do processo de secagem está relacionada com a qualidade do produto final.

Por isso, é considerada uma das mais importantes operações unitárias na engenharia de alimentos, servindo como uma maneira possível de aumentar a vida de prateleira de alimentos de alto teor de umidade, em especial frutas e vegetais. Isto ocorre pela redução do conteúdo de água do alimento a ponto de minimizar o crescimento microbiano e as reações químicas indesejáveis (RUIZ-LÓPEZ et al., 2008).

Os métodos de cálculo da taxa de secagem diferem de acordo com o período verificado no processo: taxa constante e/ou decrescente. Para produtos agrícolas e alimentícios, o período de taxa decrescente é quase sempre o único observado e, neste caso, a transferência interna de água é que governa e determina a taxa de secagem (DAUDIN, 1983).

Objetivou-se descrever o processo de secagem do eixo central de jaca por modelos matemáticos e determinar qual modelo matemático apresentou os melhores ajustes para as características avaliadas.

## MATERIAL E MÉTODOS

As frutas foram adquiridas no pomar do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias, selecionadas quanto a tamanho, estado de maturação e ausência de danos mecânicos. Em seguida, foram conduzidas até o Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Frutícolas para a extração do eixo central.

A secagem ocorreu em estufa de modelo SL 102/42 (Estufa de Secagem com Circulação e Renovação de Ar) em quatro temperaturas diferentes (50, 69, 70 e 80 °C), onde o material foi disposto em forma de camadas delgadas em bandejas vazadas forjadas em aço inoxidável medindo 15 cm de comprimento, 10 cm de espessura e 5 cm de profundidade. Em cada bandeja foi utilizado em torno de 25 g de material vegetal, padronizado nas dimensões 2 x 2 x 0,2 cm (CxLxE), previamente pesado em uma balança semianalítica, contendo seis repetições cada, em todas as temperaturas. O conteúdo de umidade de equilíbrio foi determinado com base no equilíbrio termodinâmico no sistema. Quando as bandejas atingiram peso constante, foi medida a umidade relativa do sistema através da relação  $aw = UR/100$  obtendo-se a atividade de água das amostras. Os dados experimentais estão expressos na forma de razão de umidade ( $X^*$ ), descritos pela Eq. 1:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Em que:

$X^*$  - razão de umidade;

$X_e$  - teor de água de equilíbrio, bs;

$X_0$  - teor de água inicial, bs;

$X$  - teor de água em base seca.

As amostras após secas foram trituradas com o auxílio de um moinho de facas até atingir aspecto pulverulento, semelhante à farinha para realização das determinações analíticas e toxicológicas.

Para o ajuste dos modelos matemático das curvas de desidratação do eixo central de jaca aos dados experimentais, foram utilizadas as equações empíricas descritas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Modelos empíricos utilizados para descrição da quantidade de água no eixo central de jaca.

Modelo	Nome	Expressão empírica
1	Lewis	$\sigma e^{-at}$
2	Henderson e Pabis	$ae^{-bt}$
3	Peleg	$\sigma - t/(a+bt)$
4	Page	$\sigma e^{-(at)^b}$
5	Wang e Singh	$\sigma + at + bt^2$
6	Silva et alii	$\sigma e^{-at-b^2t}$

$\sigma$  - quantidade de água inicial; a, b - são as constantes dos modelos; t - tempo.

Fonte: Pereira (2016)

Para os ajustes dos dados experimentais utilizou-se o programa *computacional LAB Fit Curve Fitting software* (SILVA; SILVA, 2015). Os critérios de avaliação utilizados para a escolha dos modelos foram os que representaram os

melhores o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ), calculado pela equação (2). O parâmetro estatístico  $R^2$  define a eficiência do modelo com a variação dos dados e o  $\chi^2$  mede a proximidade dos dados calculados com os experimentais.

$$\chi^2 = \sqrt{\sum (X_{exp}^* - X_{pre}^*)^2} \quad (2)$$

Em que:

$\chi^2$  = qui-quadrado;

$X_{exp}^*$  = razão de umidade predita pelo modelo;

$X_{pre}^*$  = razão de umidade experimental.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na modelagem da cinética de secagem do eixo central da jaca foram empregados os modelos de Henderson e Pabis, Lewis, Page, Wang e Singh, Silva et alii e Peleg. Os parâmetros obtidos a partir do ajuste dos modelos estão representados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros de ajuste dos modelos experimentais aos dados da secagem do eixo central de jaca, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C.

Henderson e Pabis				
Temperatura (°C)	Parâmetros		$R^2$	$\chi^2$
	a	b		
50	1,0497	0,0089	0,9970	0,0110
60	1,0427	0,0122	0,9933	0,0205
70	1,0097	0,0188	0,9976	0,0066
80	1,0502	0,0225	0,9952	0,0124

Lewis				
Temperatura (°C)	Parâmetros		$R^2$	$\chi^2$
	a	b		
50	0,0083	-	0,9979	0,0218
60	0,0115	-	0,9948	0,0271
70	0,0186	-	0,9978	0,0068
80	0,0211	-	0,9964	0,0187

Page				
Temperatura (°C)	Parâmetros		$R^2$	$\chi^2$
	a	b		
50	0,0033	1,1982	0,9994	0,0017
60	0,0042	1,2244	0,9982	0,0051
70	0,0133	1,0837	0,9984	0,0039
80	0,0090	1,2235	0,9992	0,0017

Wang e Singh				
Temperatura (°C)	Parâmetros		$R^2$	$\chi^2$
	a	b		
50	-0,0056	0,7499x10 <sup>-5</sup>	0,9864	0,0468
60	-0,0078	0,1438x10 <sup>-4</sup>	0,9899	0,0322
70	-0,0115	0,3011x10 <sup>-4</sup>	0,9771	0,0899
80	-0,0140	0,4547x10 <sup>-4</sup>	0,9852	0,0388

Silva et alii				
Temperatura (°C)	Parâmetros		$R^2$	$\chi^2$
	a	b		
50	0,0107	-0,0233	0,9990	0,0037
60	0,0147	-0,0265	0,9959	0,0120
70	0,0203	-0,0116	0,9978	0,0055
80	0,0277	-0,0418	0,9980	0,0048

Peleg				
Temperatura (°C)	Parâmetros		$R^2$	$\chi^2$
	a	b		
50	107,0478	0,7291	0,9889	0,0408
60	80,4763	0,6997	0,9864	0,0376
70	44,5151	0,7817	0,9897	0,0231
80	42,0913	0,7358	0,9853	0,3398

Analisando os parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais, nota-se que o modelo de Page foi o que obteve os melhores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando de 0,9982 a 0,9994 e os menores qui-quadrados ( $\chi^2$ ), apresentando um melhor ajuste dos dados da curva em relação aos outros modelos experimentais. Os modelos de Henderson e Pabis, Lewis, Silva et alii também demonstraram uma boa representação de ajuste dos dados experimentais obtendo coeficientes de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,99 (Tab. 2). No modelo de Lewis foi observado um aumento progressivo na constante a em função da elevação da temperatura.

Mesmo apresentando valores estatísticos considerado bons sendo seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,97, o modelo de Wang e Singh apresentou comportamento diferente aos outros modelos quanto a sua representação gráfica de ajuste aos dados, onde chega a atravessar o campo da quantidade de água negativa antes de atingir o ponto de equilíbrio do processo de secagem (Fig. 1 F).

Santos et al. (2013) estudando a cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, ajustando os dados experimentais ao modelo de Page, observaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,98, valores semelhantes aos encontrados no presente trabalho.

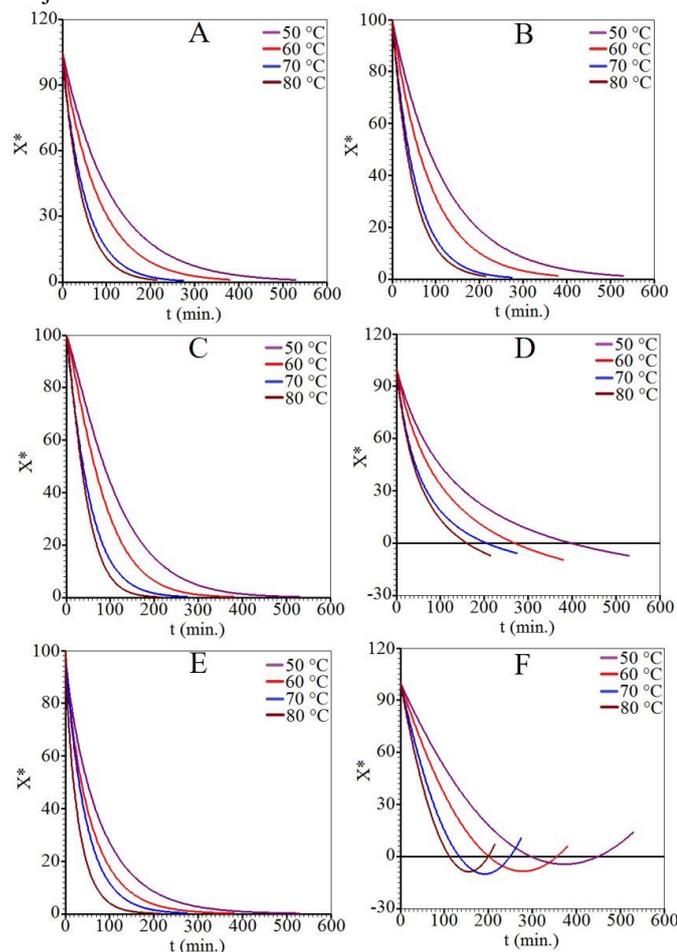
Spoladore (2014) trabalhando com secagem da casca de maracujá constatou que todos os modelos selecionados, Henderson e Pabis, Page e Newton, mostraram bom ajuste. Os valores de  $R^2$  variaram de 0,982 a 0,998, sendo a melhor condição experimental verificada para a secagem a 90 °C pelo modelo de Page. O mesmo modelo apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais em todas as temperaturas estudadas (60, 70, 80 e 90 °C).

Podemos observar a influência da temperatura na Fig. 1 onde há uma diminuição do teor de umidade de equilíbrio em função do aumento da temperatura, é notório também que a perda do conteúdo de umidade é mais rápida no início do processo de secagem.

Afonso Junior e Corrêa (1999) constataram comportamento semelhante trabalhando com cinética de secagem em cama fina de sementes de feijão onde a equação com base no modelo de Page foi a que melhor se ajustou aos dados observados de razão de umidade do feijão, apresentando melhor comportamento para representar a secagem de sementes de feijão em camada delgada, enquanto que Kurozawa (2005) analisando o processo de secagem de cogumelo observou um melhor ajuste do modelo de Page em relação ao de Fick e ao exponencial, com erros relativos médios inferiores a 5%, podendo ser utilizado para a predição da cinética de secagem.

Alexandre et al. (2009) trabalhando com secagem de abacaxi verificou que dos modelos testados o de Page foi o que apresentou os melhores ajustes para o coeficiente de determinação.

**Figura 1.** Ajustes dos modelos de Henderson e Pabis (A), Lewis (B), Page (C), Peleg (D), Silva et alii (E) e Wang e Singh (F) nas quatro temperaturas de secagem do eixo central de jaca.



## CONCLUSÕES

O tempo de secagem reduziu em função do aumento da temperatura e dentre os modelos estudados o modelo de Page foi o que apresentou os melhores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os menores qui-quadrados ( $\chi^2$ ) e o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de Modelos Matemáticos para Descrição da Cinética de Secagem em Camada Fina de Sementes de Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n.3, p. 349-353, 1999.

ALEXANDRE, H. V.; GOMES, J. P.; BARROS NETO, A. L.; SILVA, F. L. H.; ALMEIDA, F. de A. C. Cinética de secagem de abacaxi cv pérola em fatias. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 11, p. 123-128, 2009.

ANDRADE, E. T. Qualidade até o final: Secagem certa. *Cultivar Máquinas*. v.III, n.25, 15p, 2003.

ATHIÉ, I.; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTINI, S. R. T. Conservação de grãos. Campinas: Fundação Cargill, 1998. 236p.

CHOWDHURY, F. A.; RAMAN, M. A.; MIAN, A. J. Distribution of free sugars and fatty acids in jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*). *Food Chemistry*, v.60, No. 1, p.25-28, 1997.

DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Sciences des Aliments*, Paris, v.3, n.1, p.1-36, 1983.

KUROZAWA, L. E. Efeito das condições de processo na cinética de secagem de cogumelo (*Agaricus blazei*). Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2005.

RUIZ-LÓPEZ, I. I.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E.; COBOS-VIVALDO, R.; HERMAN-LARA, E. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods. *Journal of Food Engineering*, v. 89, p. 310-318, 2008.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.2, p.223-231, 2013.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; LAB Fit Curve Fitting Software (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) V 7.2.48 (1999-2015), online, available from world wide web: <www.labfit.net>, date of access: 2016-05-01.

SILVEIRA, P. L. Estudo da elaboração de passas de polpa, aproveitamento dos caroços e resíduos da jaca (*Artocarpus heterophyllus*). 2002. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2002.

SIDHU, A. S. Jackfruit Improvement in the Asia-Pacific Region – A status Report. Bangkok: Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institutions (APAARI), 2012. 182p.

SOUZA, T. S.; CHAVES, M. A.; BONOMO, R. C. F.; SOARES, R. D.; PINTO, E. G.; COTA, I. R. Desidratação osmótica de frutículos de jaca (*Artocarpus integrifolia* L.): aplicação de modelos matemáticos. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá-PR, v.31, n.2, p.225-230, 2009.

SPOLADORE, S. F. Modelagem matemática da secagem de casca de maracujá e influência da temperatura na cor, compostos fenólicos e atividade antioxidante. Trabalho de conclusão de curso, 35p. (Curso superior de Engenharia de Alimentos) Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – PR, 2014.

VIEIRA NETO, R. D. Frutíferas potenciais para os tabuleiros costeiros e baixadas litorâneas. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros/ Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe, 2002. 216p.