



Análise e descrição matemática da secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophylla (lam.) eyma.*) em camada fina

Analysis and math taturubá pulp (*Pouteriamacrophylla (lam.) eyma.*) drying to thin layer description

Deise Souza de Castro¹

Luzia Marcia de Melo Silva²

Inácia dos Santos Moreira³

Francinalva Cordeiro de Sousa⁴

Wilton Pereira da Silva⁵

Francisco de Assis Cardoso Almeida⁶

Resumo: O estudo dos métodos de ampliação da oferta de frutíferas exótica é desenvolvido de forma a facilitar a industrialização auxiliando no desenvolvimento de novos produtos. Objetivou-se neste trabalho ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem em camada fina de polpa de taturubá (*PouteriaMacrophylla(Lam.) Eyma.*) em diferentes temperaturas e determinar a taxa de secagem a partir do melhor modelo representativo do processo. Para a representação da cinética de secagem em camada fina foram empregados ajustes dos dados experimentais em diferentes modelos e selecionado aquele que melhor representou o fenômeno de secagem e como critério de avaliação destes utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) e o qui-quadrado χ^2 . Mediante os resultados obtidos observou-se que o aumento da temperatura diminuiu o tempo de secagem da polpa de taturubá. Dentre os modelos aplicados o de Page é o que melhor representa o fenômeno de secagem apresentando os maiores valores de R^2 e os menores valores de χ^2 . O tempo do processo variou

¹ UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

² UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

³ UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

⁴ UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

⁵ UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

⁶ UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

entre 1550 e 900 minutos. A máxima taxa de secagem, obtida por expressão empírica a partir do modelo de Peleg, ocorre no início do processo.

Palavras-chave: Fruta exótica; transferência de massa; expressão empírica.

Abstract: The study of the amplification methods of the supply of exotic fruit is developed to facilitate industrialization assisting in the development of new products. The objective of this work was to fit mathematical models to experimental data of drying thin layer of taturubá pulp (*Pouteria Macrophylla* (Lam.) Eyma.) At different temperatures and determine the drying rate from the best representative of the process model. For the representation of the thin layer drying kinetics were employed adjustments of the experimental data in different models and selected the one that best represented the drying phenomenon and as an evaluation criterion of these used the coefficient of determination (R^2) and the chi-square (χ^2). From the results obtained it was observed that increasing the temperature decreased drying time of taturubá pulp. Among the models applied the Page is what best represents the drying phenomenon showed the highest R^2 values and the lowest values χ^2 . The process time varied between 1550 and 900 minutes. The maximum drying rate, obtained by empirical expression from the Peleg model, occurs early in the process.

Keywords: Exotic fruit; mass transfer; empirical expression.

1. Introdução

A secagem é um processo termo-físico que consiste na remoção da água de um produto, a qual tem sido utilizada como prática artesanal para a produção de alimentos e preservação por longos períodos. O interesse no desenvolvimento de novos produtos adicionou as metodologias de secagem uma maior importância como método de processamento (Ferreira & Candeias 2005; Silva *et al.* 2014a).

A aplicação das técnicas de secagem para a conservação de frutos vem sendo aplicada de forma a aumentar a disponibilidade de mercado. Souza *et al.* (2012); Nunes *et al.* (2014); e André *et al.* (2014) utilizam a secagem de frutos como método de obtenção de alimentos de fácil estocagem, embalagem e armazenamento e como diminuição da atividade de água, responsável pela rápida deterioração.

Segundo Castro *et al.* (2014), a disponibilidade de recursos naturais associada a grande extensão territorial do Brasil, forma biomas característicos capaz de oferecer uma grande variedade de frutos nativos, os quais estão cada vez mais presentes na dieta dos brasileiros. O taturubá (*Pouteria Macrophylla* (Lam.) Eyma.) pertence a família das Sapotacea, ao gênero *Pouteria* Aublet que compreende cerca de 300 espécies, e é originário da Amazônia oriental ou do norte da América do sul (Swenson & Anderbeg, 2005), podendo ser encontrado em cidades da região norte, nordeste e sudeste do Brasil. Recentes estudos caracterizam o fruto com grande potencial de exploração comercial e promissor na elaboração bebidas prontas para consumo.

Pesquisas de métodos de ampliação da oferta e do consumo desta frutífera exótica devem ser desenvolvidas a fim de estender a vida útil tanto quanto a agregação de valor. Neste contexto os métodos de secagem se enquadram como excelente método de preservação e prolongamento da vida útil dos alimentos os quais costumam ser representados por modelos matemáticos a fim de compreender o comportamento durante o processo de secagem, e determinar as etapas envolvidas para o alimento (Hall 2004, Vega *et al.*, 2007).

Objetivou-se neste trabalho ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem em camada fina de polpa de taturubá (*Pouteria Macrophylla*(Lam.) Eyma.) em diferentes temperaturas e determinar a taxa de secagem a partir do melhor modelo representativo do processo.

2. Material e métodos

Os dados experimentais foram obtidos no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

Os frutos do taturubá (Fig. 1) foram adquiridos em uma propriedade rural na cidade de Goiana Zona da Mata norte de Pernambuco, em seu completo estágio de maturação, apresentando coloração da casca amarelo com variações de tonalidade para o marrom. O transporte dos frutos foi

realizado em sacos estéreis até o laboratório onde após recepcionados, foram selecionados, lavados e sanitizados em solução clorada a 50 ppm por 15 minutos.



Figura 1: *Pouteria Macrophylla* (Lam.) Eyma (Fonte: Castro *et al.*, 2014)

O despulpamento foi realizado manualmente com auxílio de faca e espátula de aço inoxidável. A polpa foi acondicionada em sacos de polietileno de aproximadamente 100 gramas, armazenados em freezer horizontal a temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ onde permaneceram até o início das análises.

O descongelamento da polpa foi realizado em temperatura de refrigeração a 5°C antes do início da secagem. A seguir a polpa foi acondicionada em placas de vidro, contendo cada placa aproximadamente 100g de polpa, a qual foi uniformemente espalhada com espátulas de aço inoxidável. O teor de água inicial da polpa foi determinado, segundo método padrão de estufa a $105 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, utilizando três repetições da amostra, cada uma com aproximadamente 10 g, que permaneceram em estufa por 24 h (Brasil, 2008). Após serem retiradas da estufa, as amostras foram resfriadas em dessecador por 45 min, e pesadas em balança analítica; a determinação do teor de água inicial foi obtida pela fórmula:

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \quad (1)$$

em que: X – teor de água inicial; m_{H_2O} - massa de água; m_s - massa seca.

O equipamento utilizado para a determinação da cinética de secagem foi um secador com circulação forçada de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de secagem de 2,5m/s.

As curvas foram determinadas com três níveis de temperatura (50, 60, e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) em três repetições. A umidade relativa média do ar ambiente foi de $62 \pm 3\%$. As leituras em relação à perda de peso da amostra foram realizadas em intervalos regulares, iniciando-se a cada 5 min., acompanhada até atingir peso constante. Os dados experimentais foram expressos na forma de razão de umidade (X^*):

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2)$$

Em que: X – teor de água, base seca, bs;

X_e – teor de água de equilíbrio, bs; X_0 – teor de água inicial, bs.

Para descrição da cinética de secagem foram utilizados os modelos de regressão não linear propostos por de Henderson & Pabis, Lewis, Page, Silva et alii e Wang & Singh, as quais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos de regressão não linear utilizados para descrição da cinética de secagem da polpa do taturubá

Modelo	Equação	Referência
Henderson & Pabis	$X^* = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Diamante <i>et al.</i> (2010)
Lewis	$X^* = \exp(-k \cdot t)$	Kaleta & Gornicki (2010)
Page	$X^* = \exp(-k \cdot t^n)$	Diamante <i>et al.</i> (2010)
Silva <i>et alii</i>	$X^* = \exp(-a \cdot t - b \cdot \sqrt{t})$	Silva <i>et al.</i> (2013)
Wang & Singh	$X^* = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Kaleta & Gornicki (2010)

t - tempo de secagem (min); k, - constantes de secagem; a, b, n - coeficientes dos modelos

As curvas de secagem obtidas experimentalmente foram ajustadas por meio do programa computacional LAB Fit Curve Fitting software (www.labfit.net).

Os critérios de avaliação utilizados para melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram o coeficiente de determinação (R^2) e o qui-quadrado (χ^2), calculado pela equação:

$$\chi^2 = \sqrt[2]{\sum (X_{\text{exp}}^* - X_{\text{pre}}^*)^2} \quad (3)$$

Em que: χ^2 - qui-quadrado; X_{pre}^* - razão de umidade predita pelo modelo; X_{exp}^* - razão de umidade experimental.

A partir da escolha do melhor modelo dentre os aplicados mostrados na Tabela 1, foram determinadas expressões matemáticas para a taxa de secagem em função do tempo para um teor de água adimensional.

3. Resultados e discussão

O resumo dos parâmetros de ajuste dos modelos, obtidos por meio de regressão não-linear, aplicados aos dados experimentais da secagem da polpa de taturubá em camada fina, considerando as diferentes temperaturas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do ajuste dos modelos de Henderson & Pabis, Lewis, Page, Silva *et alii* e Wang & Sing

Modelos	Temp. (°C)	Parâmetros				R ²	χ ²
		a	b	k	n		
Henderson & Pabis	50	1,0404	-	0,0221	-	0,9960	0,0268
	60	1,0466	-	0,0023	-	0,9914	0,0438
	70	1,0495	-	0,0026	-	0,9866	0,0479
Lewis	50	-	-	0,0008	-	0,9697	2,4828
	60	-	-	0,0022	-	0,9940	0,0062
	70	-	-	0,0025	-	0,9901	0,0665
Page	50	-	-	0,0006	1,2308	0,9995	0,0031
	60	-	-	0,0006	1,2308	0,9966	0,0147
	70	-	-	0,0004	1,3056	0,9990	0,0069
Silva <i>et alii</i>	50	0,0026	-0,0107	-	-	0,9983	0,0111
	60	0,0029	-0,0123	-	-	0,9943	0,0273
	70	0,0034	-0,0154	-	-	0,9930	0,0245
Wang & Singh	50	-0,0016	0,6 x 10 ⁻⁰⁶	-	-	0,9960	0,0228
	60	-0,0017	0,7 x 10 ⁻⁰⁶	-	-	0,9983	0,0069
	70	-0,0019	0,9 x 10 ⁻⁰⁶	-	-	0,9991	0,0032

A partir da análise dos parâmetros de ajuste, utilizados como requisito de escolha do melhor modelo representativo da transferência de massa durante a secagem do taturubá obtém-se o modelo de Page, com menores qui-quadrados e maiores coeficientes de determinação para as três temperaturas estudadas seguido do modelo de Silva et alii. Os modelos de Lewis e Henderson & Pabis apresentaram indicadores de ajuste menos satisfatórios, porém todos os modelos ajustados à secagem em estudo representam satisfatoriamente o processo com R² superior a 0,96.

Castiglioni et al. (2013) ao estudarem a modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca também encontraram o modelo de Page como representativo do fenômeno de transferência de massa, dentre os quatro modelos analisados. O modelo de Page também é citado como satisfatório na representação da cinética de secagem de polpa de oiti (Sousa et al., 2011).

A Figura 2 mostra a representação de ajuste do modelo de Page aos dados da secagem do taturubá, onde se verifica grande similaridade no comportamento da secagem mesmo em diferentes temperaturas durante os minutos iniciais. O baixo conteúdo de água livre presente na polpa faz com que, a taxa de remoção de água nos minutos iniciais seja muito próxima, mesmo quando a polpa é submetida a diferentes condições de temperatura. Apesar da polpa do taturubá possuir alto teor de água inicial (72,26% b.u.) a característica amilácea do produto interfere na quantidade de água superficial, a qual é rapidamente evaporada quando submetida a condições de secagem, sendo necessária uma maior quantidade de energia, para que a água presente no interior do produto migre para a superfície.

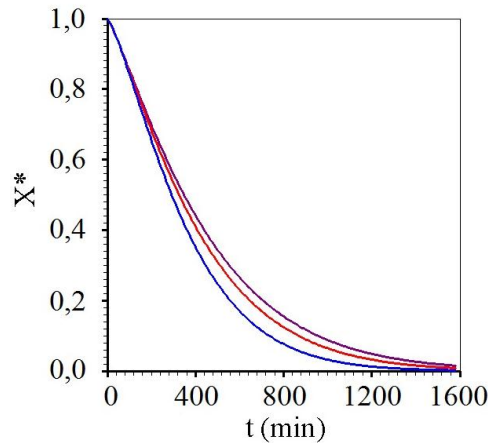


Figura 2: ajuste do modelo de Page a secagem do taturubá

Durante o estudo a secagem não apresenta um período de taxa constante definido, segundo Park et al. (2007) o fenômeno ocorre quando a resistência de transferência de massa encontra-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície do ar ambiente seja superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material.

Analisando a Figura 2 verifica-se o aumento da inclinação das curvas de secagem com a elevação da temperatura. Segundo Reis et al. (2013) na secagem realizada sob uma maior temperatura há uma maior quantidade de calor transferido a partir do ar para o material e, conseqüentemente, um aumento da velocidade de migração da água do interior para a superfície do produto.

Com relação ao tempo de secagem a polpa do taturubá atingiu o equilíbrio em 1550 min. para a temperatura de 50 °C, 1220 min. para a temperatura de 60 °C e 900 min. para a temperatura de 70 °C. De acordo com Castro et al. (2014) o fruto apresenta quantidade significativa de açúcar, dificultando a transferência de massa durante o processo.

A partir dos resultados dos parâmetros obtidos para o modelo de Page (Tab. 2) determinou-se a taxa de secagem do modelo para as três temperaturas estudadas por meio da expressão matemática (4) descrita por Diamante et al. (2010).

$$dX^* / dt = -abt^{b-1} e^{-at^b} \quad (4)$$

A descrição da taxa de secagem do modelo de Page para a polpa do taturubá encontra-se representada na Figura 3, onde é perceptível uma maior taxa de secagem no início do processo para todas as temperaturas estudadas. Segundo Silva et al. (2014b) os dados de taxa de secagem podem ser utilizados para estudar a penetração do calor e/ou a secagem em leito profundo.

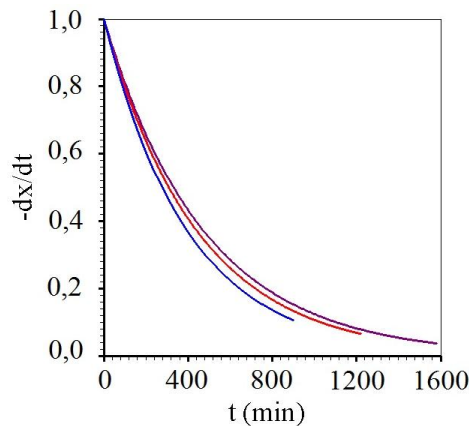


Figura 3: Taxa de secagem do modelo de Page.

4. Conclusão

Os dados obtidos na cinética destacam os períodos de taxa decrescente e estacionária durante a secagem do taturubá. O modelo de Page que melhor descreveu a transferência de massa permitiu determinar a taxa de secagem para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C

5. Referências bibliográficas

- ANDRÉ, A. M. M. C. N.; CASTRO, D. S.; ALMEIDA, R. D.; OLIVEIRA, V. F.; MOREIRA, I. S. 2014. *Comparação de Modelos Matemáticos da Cinética de Secagem de cascas de Manga Espada*. Revista verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 9, n. 3, p. 19-28.
- BRASIL. *Métodos químicos e físicos para análise de alimentos*. Instituto Adolfo Lutz. 4.ed. Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz. São Paulo. v.1, 2008. 1020p.
- CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S. 2013. *Modelagem Matemática do Processo de Secagem da Massa Fibrosa de Mandioca*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.9, p.987–994.
- CASTRO, D. S.; SOUSA, E. P.; NUNES, J. S.; SILVA, L. M. M.; MOREIRA, I. S.; 2014. *Descrição cinética de secagem da polpa de jabuticaba usando modelos empíricos*. Revista verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 9, n. 2, p. 117-120.
- DIAMANTE L. M. R; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. 2010. *A new mathematical model for thin layer drying of fruits*. International Journal of Food Science and Technology, v. 45, n. 9, p. 1956–1962.
- FERREIRA, A.; CANDEIAS, M. 2005. *Secagem solar de frutos e plantas aromáticas*. Revista de Ciências Agrárias, v. 28, n. 1, p. 363–370.
- HALL, C. W. *Handbook of Industries drying*. Publisher Taylor & Francis Group, LLC. 3ª Edition, 2004.
- KALETA, A.; GÓRNICKI, K. 2010. *Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer*. International Journal of Food Science and Technology, v. 45, n. 5, p. 891–898.
- NUNES, J. S.; CASTRO, D. S.; MOREIRA, I. S.; SOUSA, F. C.; SILVA, W. P. 2014. *Descrição cinética de secagem da polpa de jabuticaba usando modelos empíricos*. Revista verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 9, n. 1, p. 20-26.
- PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. DE; PARK, K. J. B. *Conceitos de processos e equipamentos de secagem*. Campinas: UNICAMP, 2007.
- REIS, R C.; CORRÊA, P. C.; DEVILLA, I. A.; SANTOS, E. S.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. 2013. *Drying of yam starch (Dioscorea spp.) and glycerol filmogenic solutions at different temperatures*. LWT - Food Science and Technology, v. 50, n. 2, p. 651–656.
- SILVA, V.; FIGUEIREDO, A. R.; COSTA, J. J.; GUINÉ, R. P. F. 2014a. *Experimental and mathematical study of the discontinuous drying kinetics of pears*. Journal of food Engineering, v. 134, p. 30-36.

- SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. P. 2014b. *Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, v. 13, n. 1, p. 67–74.
- SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SOUSA, J. A. R.; FARIAS, V. S. O. 2013. *Empirical and diffusion models to describe water transport into chickpea (Cicerarietinum L.)*. International Journal of Food Science and Technology, v. 48, n. 2, p. 267-273.
- SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; SILVA, L. M. M.; MARTINS, J. J. A.; GOMES, J. P.; ROCHA, A. P. T. 2011. *Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti*. Revista Educação Agrícola Superior, v. 26, n. 2, p. 108-112.
- SOUZA, D. S.; SOUZA, J. D. R. P.; COUTINHO, J. P.; FERRÃO, S. P. B.; SOUZA, T. S.; SILVA, A. A. L. 2012. *Elaboração de farinha instantânea a partir da polpa de fruta-pão (Artocarpusaltilis)*. Revista Ciência Rural, v. 42, n. 6, p. 1123-1129.
- SWENSON U.; ANDERBERG A. A. 2005. *Phylogeny, character evolution and classification of Sapotaceae (Ericales)*. Cladistics, v. 21, n.2, p.101–130.
- VEGA, A. G.; TELLO, C. I.; LEMUS, R. M. 2007. *Mathematical simulation of drying process of chilean gracilaria (Gracilariachilensis)*. Revista chilena de engenharia, v. 15, n. 1, p 55-64,