

## CINÉTICA DE SECAGEM DE MAMÃO POR DIFERENTES MÉTODOS

IVAN BAZO BERGAMIM<sup>1</sup>, CAMILA LOPES BONFIM<sup>2</sup>, CAROLINA MARIA  
SANCHEZ-SAENZ<sup>3</sup>, RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP,  
ivan.bergamim@feagri.unicamp.br

<sup>2</sup> Nutricionista, Mestranda em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP.

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Profa. Doutora, Faculdade de Engenharia, Universidade Nacional de Colombia, UNAL, Bogotá D.C.

<sup>4</sup> Eng. Agrícola, Livre-Docente, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP.

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** A secagem é um dos métodos mais tradicionais para preservação de produtos biológicos. Ele tem por princípio a redução da umidade do produto até níveis adequados para armazenamento. O estudo da cinética de secagem é fundamental para adequado controle e gerenciamento do processo. Dessa forma, este trabalho objetivou avaliar a cinética de secagem de mamão submetido a diferentes métodos de secagem. Foram utilizados um secador por janela de refractância (RW), com 70, 80 e 90°C, e um secador convectivo (C), a 50, 60 e 70°C e 0,5 m.s<sup>-1</sup>. Foram analisadas as taxas de secagem de cada ensaio, para posterior regressão matemática das curvas de secagem a partir dos modelos de Fick e de Page. Segundo os resultados, as taxas foram decrescentes em função do tempo e acompanharam o aumento da temperatura de secagem, sendo que o tratamento RW90 apresentou as maiores taxas e o C50 as menores. Os dois modelos apresentaram bons ajustes, de acordo com suas métricas de regressão. As difusividades efetivas  $D_{ef}$  dos ensaios acompanharam o aumento da temperatura, com o RW90 apresentando o valor de 6,183E-10 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>, enquanto o C50 foi o menor, com valor de 2,651E-10 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** secagem por janela de refractância; taxa de secagem; difusão.

## DRYING KINETICS OF PAPAYA BY DIFFERENT METHODS

**ABSTRACT:** Drying is one of the most traditional methods for preserving biological products. Its principle is to reduce the moisture content of the product to suitable levels for storage. The study of drying kinetics is essential for proper control and management of the process. Therefore, this work aimed to evaluate the drying kinetics of papaya subjected to different drying methods. A refractance window dryer (RW) was used at 70, 80, and 90°C, and a convective dryer (C) was used at 50, 60, and 70°C with an air velocity of 0.5 m.s<sup>-1</sup>. The drying rates of each treatment were analyzed to subsequently mathematical regression of the drying curves using Fick's and Page's models. According to the results, the rates decreased over time and followed the increase in drying temperature, with the RW90 treatment showing the highest rates and the C50 treatment showing the lowest rates. Both models exhibited good fits, according to their regression metrics. The effective diffusivities ( $D_{ef}$ ) of the treatments increased with temperature, with RW90 having a value of 6.183E-10 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>, while C50 had the lowest value of 2.651E-10 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>.

**KEYWORDS:** refractance window drying; drying rate; effective diffusivity.

**INTRODUÇÃO:** O mamão (*Carica papaya* L.) possui um destaque dentre os produtos de alto valor nutricional. É um fruto climatérico, sendo consumido fresco ou processado, permitindo a criação de diversos outros produtos elaborados. Possui uma grande presença no mercado, sendo perecível e com alta capacidade de amadurecimento (JÚNIOR et al., 2018). O incremento da vida útil de produtos agrícolas é feito pela secagem, que visa a redução da umidade. Ela é a combinação simultânea de fenômenos de transferência de calor e massa. É um processo custoso, sendo responsável por boa parte do consumo global de energia (MUJUMDAR, 2015). A secagem permite redução de custo de armazenamento, transporte e abastecimento dos produtos (AKTAŞ et al., 2017). A cinética de secagem visa medir o comportamento do processo, acompanhando o decréscimo de massa. Dentro desta curva, pode-se verificar diversos outros comportamentos, como, a taxa de secagem. Ela possui o período de indução, taxa constante e taxa decrescente. Este último, descrito como período difusional mássico de umidade é modelado pela 2ª lei de Fick da difusão, permitindo encontrar o coeficiente de difusividade efetiva, que mede a rapidez que o produto seca. Neste período, há modelos semi-empíricos, sendo um deles o modelo de Page. Estes modelos podem ser aplicados a diversos secadores. A secagem convectiva por ar quente (C), no qual o ar de secagem é aquecido e entra em contato diretamente com o produto. A secagem por janela de refractância, ou *refractance window drying*, é um processo de secagem por condução. O produto é sobreposto em um poliéster resistente em contato direto com a água de um reservatório que se encontra próximo do ponto de ebulição (RAGHAVI; MOSES; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2018).

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os frutos foram adquiridos em um mercado local. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Secagem do Laboratório de Tecnologia Pós-Colheita, da Faculdade de Engenharia Agrícola (UNICAMP). Os mamões foram cortados em fatias com espessura média e desvio padrão de  $3,442 \pm 0,873$  mm. Os parâmetros de secagem foram: 50, 60 e 70°C de temperatura de secagem e velocidade do ar fixa de  $0,50 \text{ m.s}^{-1}$  para a secagem convectiva por ar quente (C) e 70, 80 e 90°C na secagem por janela de refractância (RW). Foi realizada a cinética de secagem para os ensaios C e RW. A secagem foi feita com a pesagem periódica dos suportes que comportaram o produto nos ensaios C e RW até peso constante. A umidade inicial do mamão foi determinada pelo método de estufa 105°C por 24 h (AOAC, 2019) sendo igual a  $0,870 \pm 0,003$ , base úmida. Foram levantados dois tipos de gráficos: a razão de umidade adimensional (Y) em função do tempo, em minutos; e a taxa de secagem (DR,  $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{massa seca}}$ ) em função da umidade, em base seca (X,  $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{massa seca}}$ ). A partir do comportamento da taxa de secagem, foi identificado que os processos de secagem permaneceram no período decrescente. Com isso, foi utilizado o modelo de Fick para placa plana sem encolhimento (CRANK, 1975), para determinação do coeficiente de difusão efetiva ( $D_{\text{ef}}$ ,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  – equação 1) e o modelo semi-empírico de Page (equação 2) (PAGE, 1949) para modelagem das curvas de secagem. Para a análise estatística de regressão dos modelos, foram usados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ); a raiz do erro médio quadrado (RMSE) e o chi quadrado reduzido ( $\chi^2$ ).

$$Y = \frac{8}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2 \times n - 1)^2} \times \exp \left[ -(2 \times n - 1)^2 \times \frac{\pi^2 \times D_{\text{ef}} \times t}{4 \times l^2} \right] \quad (1)$$

$$Y = \exp (-g \times t^j) \quad (2)$$

em que: Y – razão de umidade (adimensional); n = número de termos;  $D_{\text{ef}}$  = coeficiente de difusividade efetiva ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ); t = tempo (s); l = espessura (m); g, j = constantes de Page.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Figura 1a) apresenta as curvas de secagem experimentais dos ensaios convectivos C e também as curvas preditas dos modelos de Fick e Page. Indica que as inclinações das linhas aumentaram nos ensaios de maior temperatura, apresentando a seguinte ordem: C70, C60 e C50. A Figura 1b) mostra as curvas dos ensaios RW, que, da mesma forma, indica a mesma tendência, em que a ordem de maiores inclinações das curvas são: RW90, RW80 e RW70. Em geral, os processos de RW são mais rápidos que os C, apresentando assim maiores taxas de secagem e maiores coeficientes de difusividade efetivas. A Figura 1c) apresenta as taxas de secagem de todos os ensaios. As curvas de todos eles mostram tendência de taxa decrescente, permitindo assim o uso dos modelos difusional e de Page. De modo geral, os ensaios convectivos C obtiveram menores taxas comparativamente aos ensaios RW.

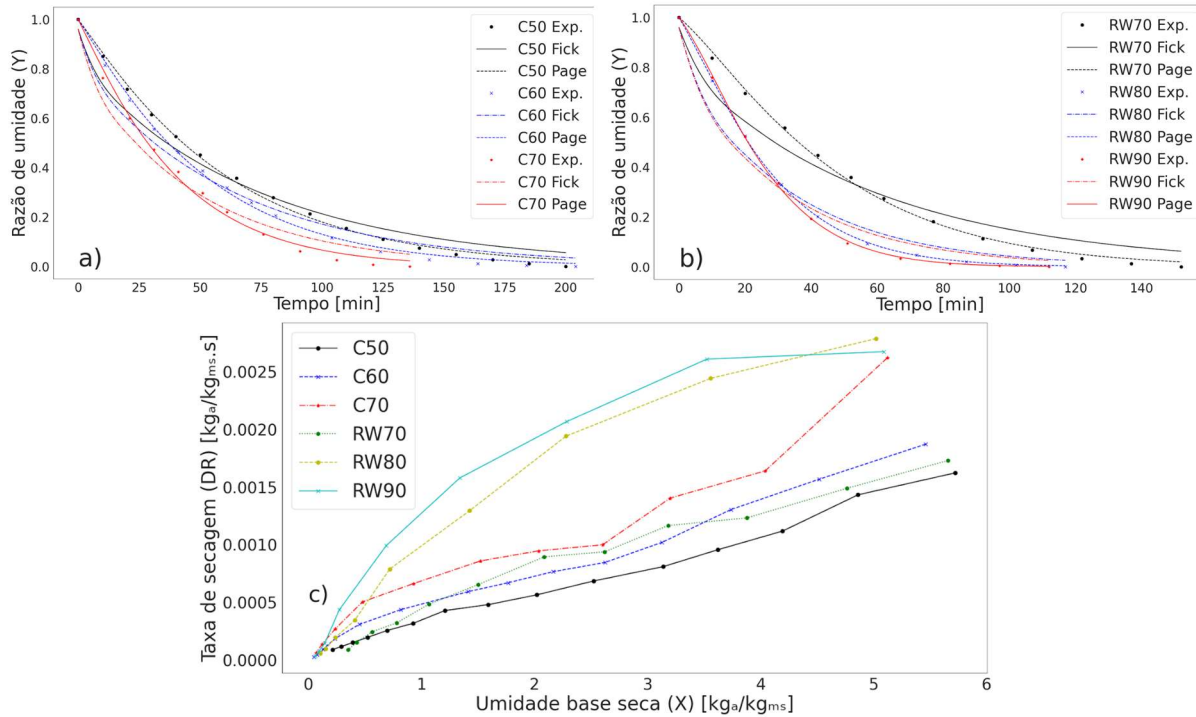


FIGURA 1. Curvas de secagem convectiva por ar quente (a); de secagem por janela de refratância (b) e de taxa de secagem (c).

TABELA 1. Difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) e métricas de regressão.

Ensaio	$D_{ef}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
<b>C50</b>	2,651E-10	9,677E-01	5,534E-02	3,282E-03
<b>C60</b>	3,099E-10	9,697E-01	5,319E-02	3,047E-03
<b>C70</b>	4,080E-10	9,699E-01	5,341E-02	3,137E-03
<b>RW70</b>	3,330E-10	9,500E-01	7,085E-02	5,476E-03
<b>RW80</b>	5,869E-10	9,648E-01	6,291E-02	4,452E-03
<b>RW90</b>	6,183E-10	9,519E-01	7,450E-02	6,244E-03

$R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz do erro médio quadrado;  $\chi^2$ : chi quadrado reduzido.

Na Tabela 1, são apresentados os resultados e suas métricas de regressão para  $D_{ef}$  de cada um dos ensaios realizados. Os valores de  $D_{ef}$  foram maiores, quão maiores foram as temperaturas de secagem, ressaltando a dependência da temperatura conforme Equação de Arrhenius. Em geral, percebe-se que os ensaios de RW apresentaram valores de  $D_{ef}$  maiores que os ensaios C. Com relação às métricas de regressão, é possível notar que os valores atestam um bom ajuste da modelagem. Na Tabela 2, são apresentados os dados da modelagem e determinação das constantes do modelo de Page, g e j. Com relação às métricas estatísticas de regressão do

modelo de Page, tem-se que o  $R^2$  para todos os ensaios apresentaram valores acima de 95% de ajuste com os dados experimentais. No caso do RMSE e  $\chi^2$ , tem-se que os seus resultados indicam que o ajuste do modelo foi muito próximo dos dados experimentais, apresentando valores entre 2 e 5 casas decimais. O ajuste do modelo de Page foi melhor se comparado com o de Fick.

TABELA 2. Constantes do modelo de Page e métricas de regressão.

Ensaio	g	j	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
<b>C50</b>	1,269E-02	1,064E+00	9,978E-01	1,434E-02	2,374E-04
<b>C60</b>	1,408E-02	1,083E+00	9,981E-01	1,326E-02	2,051E-04
<b>C70</b>	1,863E-02	1,080E+00	9,949E-01	2,201E-02	5,919E-04
<b>RW70</b>	9,521E-03	1,196E+00	9,982E-01	1,351E-02	2,191E-04
<b>RW80</b>	1,766E-02	1,208E+00	9,999E-01	3,239E-03	1,349E-05
<b>RW90</b>	1,245E-02	1,324E+00	9,996E-01	6,378E-03	4,230E-05

$R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE = raiz do erro médio quadrado;  $\chi^2$ : chi quadrado reduzido.

**CONCLUSÕES:** O método de secagem proporciona uma mudança relevante no tempo de secagem, assim como na inclinação (taxas) das curvas de cada ensaio. Os ensaios de maiores temperaturas apresentam tempos de secagem menores. A taxa de secagem mais acentuada ocorreu no RW90, com a menor sendo o C50. Assim, o método com maior difusividade efetiva foi o RW90, enquanto o menor foi o C50. Tanto o modelo de Fick como o de Page se ajustaram bem com os dados experimentais, mas com o de Page apresentando melhores métricas de ajuste.

**AGRADECIMENTOS:** Grupo de Pesquisa CT&EA da FEAGRI/UNICAMP pelo apoio; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de mestrado e doutorado e à Universidade Nacional de Colombia (UNAL).

## REFERÊNCIAS:

AKTAŞ, M. et al. Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer.

**International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 28, p. 18034–18044, 2017.

AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International**. 21. ed. Rockville, Maryland: AOAC International, 2019.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2. ed. Bristol: Oxford University Press, 1975.

JÚNIOR, E. V. da S. et al. Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT-Food Science and Technology**, v. 97, n. March, p. 317–322, 2018.

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. p. 3–29. 2015.

PAGE, G. E. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. [s.l.] Purdue University, 1949.

RAGHAVI, L. M.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Refractance window drying of foods: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 222, p. 267–275, 2018.