

# Utilização de secador solar na desidratação de carambola: estudo experimental e modelagem matemática

Camila Nicola Boeri Di Domenico<sup>1</sup> e Mauricio Bavaresco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Doutora em Engenharia Mecânica. Docente do Departamento Acadêmico de Física, Estatística e Matemática - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Francisco Beltrão. E-mail: camiladomenico@utfpr.edu.br <sup>2</sup> Acadêmico de Engenharia Ambiental. Bolsista de Iniciação Tecnológica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Francisco Beltrão. E-mail: mauricio-bava@hotmail.com

Resumo - Numa época em que se fala constantemente em qualidade de vida, a conservação, por meio da desidratação, tem se apresentado como uma boa alternativa para preservar as qualidades intrínsecas das frutas e evitar o uso de aditivos químicos, indo ao encontro das preferências atuais dos consumidores. Para prever, dimensionar e otimizar o processo, pode-se utilizar a modelagem matemática, onde é simulando o experimento. O presente trabalho teve como objetivo analisar o processo de desidratação da carambola (*Averrhoa carambola* L.) com o uso de um secador solar e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. Inicialmente, foi feita a construção do secador solar, em seguida foram realizados os experimentos de secagem e após obter os dados, foi executada a simulação matemática. A estufa solar apresentou funcionalidade, promovendo a retirada de água da carambola, e os modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram os de Page e o Logarítmico, com coeficientes de correlação de 0,9841 e 0,976, respectivamente.

Palavras-chave: secagem, simulação matemática, perda de água.

## Use of solar dryer in carambola dehydration: experimental study and mathematical modeling

Abstract - In a time of constant talk about quality of life, conservation, through dehydration, has been presented as a good alternative to preserve the intrinsic qualities of fruits and avoid the use of chemical additives, meeting the current preferences consumers. To predict, size and optimize the process, one can use mathematical modeling, where the experiment is simulated. The present work had as objective to analyze the process of dehydration of the carambola (*Averrhoa carambola* L.) with the use of a solar drier and adjust different mathematical models to the experimental data. Initially, the solar dryer was constructed, then the drying experiments were performed and after obtaining the data, the mathematical simulation was performed. The solar greenhouse presented functionality, promoting the removal of water from the carambola, and the mathematical models that best fit the experimental data were Page and Logarithmic, with correlation coefficients of 0.9841 and 0.976, respectively.

Keywords: drying, mathematical simulation, water loss.

### Introdução

O grande desafio dos produtores tropicais não é a apenas a produção, mas também a preservação e armazenamento da mercadoria. Um dos processos mais utilizados para manter a qualidade dos produtos em longo prazo é a desidratação ou secagem.

O processo de secagem consiste basicamente na remoção de água de determinado produto, visando obter a redução do seu metabolismo, da atividade enzimática, fúngica e bacteriana (Nascimento et al., 2015).

As frutas secas também apresentam vantagens aos produtores, uma vez que proporciona a adição de valor ao produto, eliminação das perdas em épocas de safra, além da obtenção de preços constantes ao longo do ano. Com o desenvolvimento tecnológico, o aproveitamento da energia solar vem sendo um ponto de grande importância, e para ter o aproveitamento da energia são utilizados equipamentos que transformam a energia solar em calor.

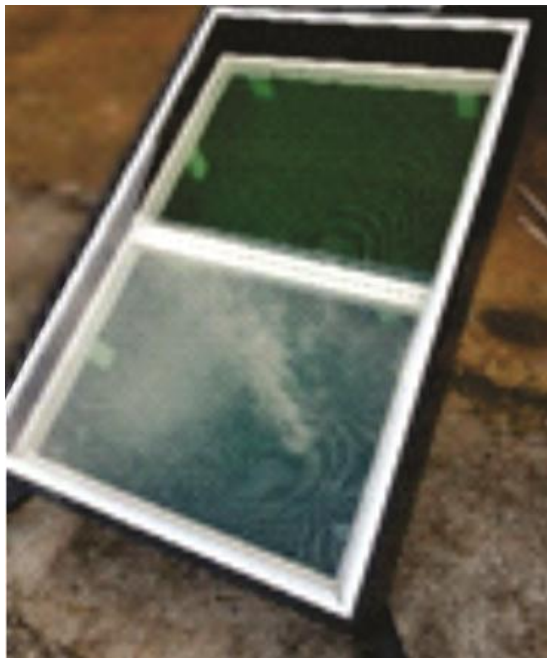
Para se ter um bom dimensionamento do equipamento de secagem, uma otimização no processo e uma determinação de sua aplicação comercial, pode-se utilizar modelagens matemáticas para representar apropriadamente a perda de água de diferentes produtos (Resende et al., 2007).

Neste sentido, o objetivo do presente artigo é analisar o processo de desidratação da carambola (*Averrhoa carambola* L.) e descrever a cinética de secagem usando secador solar, além de ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais.

### Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Francisco Beltrão. Inicialmente, foi realizada a construção do secador solar, com dimensões internas de 120,5 cm x 78,5 cm x 19 cm, apresentada na Figura 1, que então foi utilizado nos experimentos.

Os experimentos de secagem foram realizados utilizando como matéria-prima carambola *in natura*. Para a realização da parte experimental, o primeiro passo foi fazer a higienização das amostras, que então foram separadas em três repetições chamadas R1, R2 e R3. Essas amostras foram fatiadas para facilitar a perda de umidade da fruta. Algumas amostras de cada repetição foram separadas para análises físico-químicas, dentre elas: determinação de umidade inicial, teor de brix, pH e acidez.



**Figura 1.** Secador Solar  
Foto: C. N. Boeri Di Domenico

A determinação do teor de umidade inicial, em base úmida, para cada amostra, foi feita de acordo com a Equação 1, seguindo-se as normas determinadas pelo Ministério da Agricultura, submetendo-se uma massa de 15 g/20 g do produto em uma estufa a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas (Cunniff, 2002).

$$U(\% \text{ b. u.}) = \frac{(mi - mf)}{mi} \times 100 \quad (1)$$

Em que:  $U(\text{b.u.})$  = teor de umidade, em base úmida (%);  
 $mi$  = massa inicial (g);  $mf$  = massa final (g).

As amostras fatiadas foram colocadas em duas bandejas dentro do secador solar, de forma que as fatias formavam uma monocamada sendo que a circulação de ar era uniforme. Durante o processo de secagem, as frutas passaram por um acompanhamento, onde foram feitas medições em intervalos médios de 3 h, durante o dia. A noite não foram feitas medições, pois as frutas não perdem quantidades significativas de umidade nesse período, por não haver radiação solar e nem temperaturas elevadas dentro da estufa solar.

Os dados coletados em cada intervalo de tempo foram: massa das amostras, umidade interna da estufa, temperatura interna da estufa e pressão atmosférica. No momento que as frutas apresentaram teores mínimos de água, sendo que não era visível nenhuma porção líquida, então se encerrava o processo de secagem.

Com os dados coletados, converteu-se para o parâmetro adimensional razão de teor de água (RX), sendo essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada delgada. A cada tempo de secagem correlaciona-se um teor de água com o teor de água inicial e com o teor de água de equilíbrio. Os ajustes matemáticos das curvas de cinética de secagem foram realizados por meio dos modelos descritos na Tabela 1 utilizando-se o programa computacional Statistic, versão 7.0 por meio de análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton (Mendonça et al. 2015).

**Tabela 1.** Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem da carambola em fatias

Designação do modelo matemático	Equação
Logarítmico	$RX = a \cdot \text{Exp}(-kt) + c$
Page (1949)	$RX = \text{Exp}(-kt^n)$
Aproximação da difusão	$RX = a \cdot \text{Exp}(-kt) + (1-a) \cdot \text{Exp}(-kbt)$
Newton	$RX = \text{Exp}(-kt)$

$k$  - Constante de secagem;  $a, b, n, c$  - Constante do modelo;

$t$  - Tempo, horas

Para definir qual a melhor modelagem matemática para o experimento foi executado o cálculo do coeficiente de correlação (Equação 2) e do erro padrão médio (Equação 3).

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (2)$$

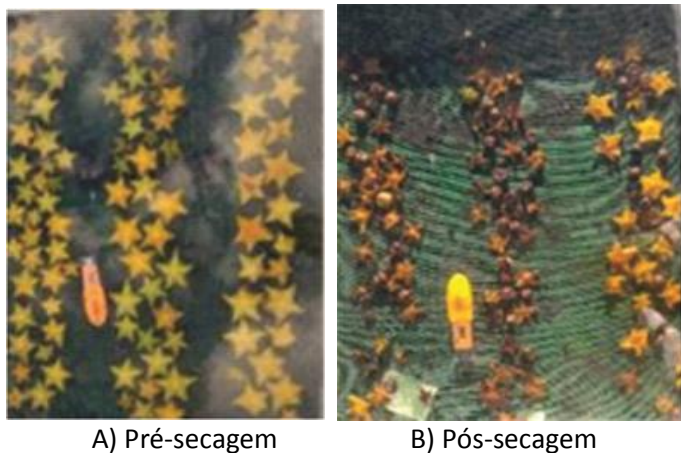
Em que:  $r$  = coeficiente de correlação;  $n$  = número de amostras;  $x$  = umidade adimensional do experimento;  $y$  = umidade adimensional da modelagem matemática.

$$p = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \left[ \sum (y - \gamma)^2 - \frac{[\sum (x - \chi)(y - \gamma)]^2}{\sum (x - \chi)^2} \right]} \quad (3)$$

Em que:  $p$  = erro padrão médio;  $n$  = número de amostras;  $x$  = umidade adimensional do experimento;  $\chi$  = média umidade adimensional experimento;  $y$  = umidade adimensional da modelagem matemática;  $\gamma$  = média umidade adimensional da modelagem matemática.

## Resultados e Discussão

A carambola in natura submetida à secagem solar encontrava-se com umidade inicial de 91,5% (b.u.), e após passar três dias e 20 horas no secador solar a umidade decaiu para 21,9% (b.u.) que pode ser observado na Figura 2.

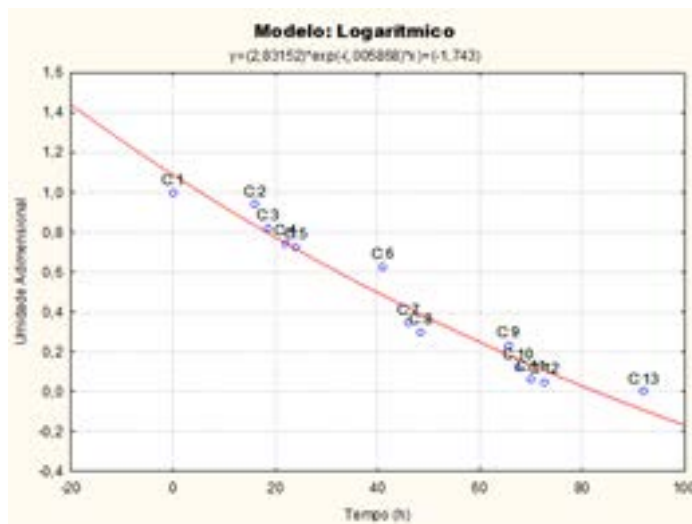


**Figura 2.** Carambola Pré e Pós Secagem  
Foto: C. N. Boeri Di Domenico

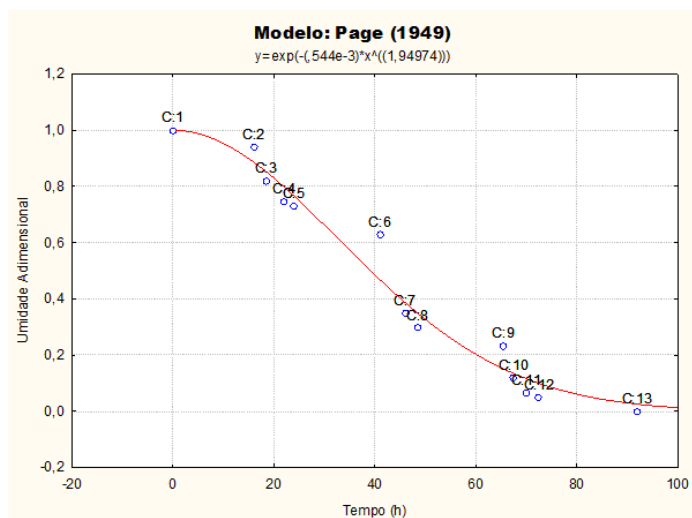
A umidade relativa média no interior da estufa foi de 43,8%, já a temperatura média no interior da estufa foi de 31,8°C. Observou-se que durante o processo de secagem a maior taxa de transferência de água do interior da carambola para o meio foi durante o período inicial do experimento, sendo que com o decorrer do tempo o processo foi mais lento, exigindo mais energia para a evaporação da água. Esse experimento teve condições climáticas favoráveis à secagem, pois durante todo o processo não foi observado períodos de precipitação pluvial ou baixa radiação solar.

Utilizando quatro modelos matemáticos diferentes para simular o efeito da secagem da carambola obtiveram-se as seguintes curvas de secagem (Figuras 3 a 6).

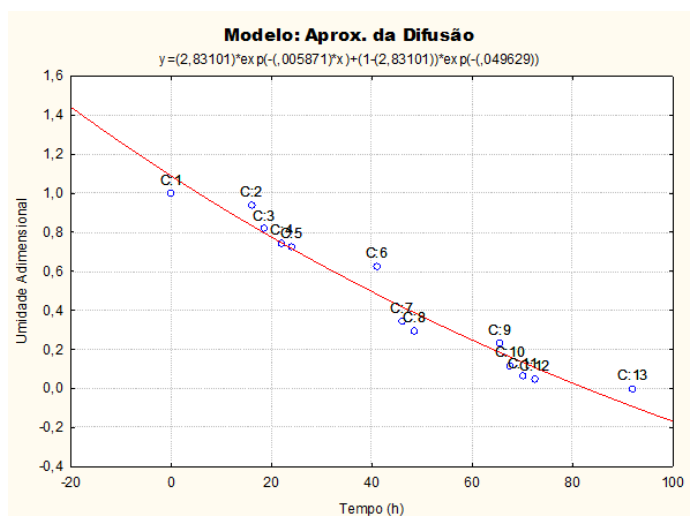
Para comparar os diferentes modelos utilizados na simulação, foram determinados os valores do coeficiente de correlação e do erro padrão médio para cada situação analisada, conforme dados da Tabela 2.



**Figura 3.** Simulação do processo de secagem pelo modelo Logarítmico



**Figura 4.** Simulação do processo de secagem pelo modelo de Page



**Figura 5.** Simulação do processo de secagem pelo modelo de Aproximação da Difusão

## Conclusões

1. O secador solar apresentou resultados satisfatórios no processo de secagem, promovendo a perda de água da carambola.

2. O modelo matemático de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da carambola, apresentando valores de coeficiente de correlação de 0,9841 e erro padrão médio de 6,7368.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Araucária, pela concessão da bolsa de Iniciação Tecnológica.

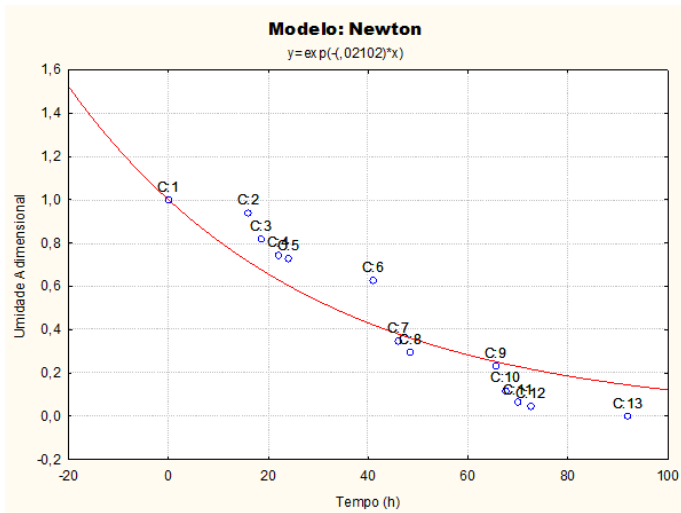
## Referências

NASCIMENTO, V. R. G.; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. v.19, n.7, p.686–692, 2015.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S.; KESTER, A. N.; LIMA, P. P. Influência do tipo de pavimento na secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiros de concreto e chão batido. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, p.171-178, 2007.

CUNNIFF, P. **Official Methods of Analysis of AOAC International**, AOAC International, Gaithersburg, MD. v.17, n.7, p. 14–15, 2002.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. v.19, n.4, p.382–387, 2015.



**Figura 6.** Simulação do processo de secagem pelo modelo Newton

**Tabela 2.** Cálculo do coeficiente de correlação e erro padrão médio dos diferentes modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem da carambola

Designação do Modelo matemático	Coeficiente de correlação	Erro-padrão médio (%)
Logarítmico	0,9760	8,2501
Page	0,9841	6,7368
Aproximação da difusão	0,9760	8,2501
Newton	0,9564	11,0655

Analisando a Tabela 2, nota-se que o modelo de Page foi o que apresentou o maior coeficiente de correlação e menor erro padrão médio, sendo o modelo que melhor descreve o processo de secagem solar da carambola. Percebe-se uma grande semelhança de valores entre o modelo Logarítmico e o modelo de Aproximação da difusão, devido ao fato de que as equações geram curvas muito semelhantes. O modelo de Newton foi o que apresentou a menor correlação de dados e o maior erro padrão médio, sendo o modelo menos eficiente.