

# **MODELADO DEL SECADO DE CÁLCICES AGOTADOS DE FLOR DE JAMAICA (*HIBISCUS SABDARIFFA* L.): EVALUACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS A DIFERENTES TEMPERATURAS**

*Sheila Palacios-Oliver\*<sup>1</sup>, Ana Silvia Falco-Manso<sup>1</sup>, José Luis Rodríguez-Sánchez<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Centro de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera al Guatao km 3½, CP 17100, Cuba.*

<sup>2</sup>*Instituto de Farmacia y Alimentos. Universidad de La Habana, CP 13600, Cuba*

*E-mail: sheila@iia.edu.cu*

*Recibido: 22-12-2025 / Revisado: 15-01-2026 / Aceptado: 25-01-2026 / Publicado: 30-04-2026*

## **RESUMEN**

Este estudio tuvo como objetivo modelar la cinética de secado de los cálices agotados de flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) a 50, 60 y 70 °C, con el fin de seleccionar el modelo empírico que mejor describa la pérdida de humedad y contribuir al aprovechamiento de este residuo como ingrediente funcional rico en fibra dietética y compuestos fenólicos. El secado se realizó en estufa de convección forzada con flujo de aire constante, utilizando bandejas con un espesor uniforme de 3 mm del material. Se evaluaron cuatro modelos

empíricos: Page, Page modificado, Henderson-Pabis y Midilli-Kucuk, mediante regresión no lineal. Los parámetros de cada modelo se calcularon y se evaluó la calidad del ajuste mediante el coeficiente de determinación ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ), error cuadrático medio (ECM) y la prueba chi-cuadrado reducido ( $\chi^2_{\text{red}}$ ). Los resultados mostraron que el coeficiente de secado ( $k$ ) aumentó con la temperatura en todos los modelos, lo que evidencia una aceleración del proceso por efecto térmico. El exponente ( $n$ ) presentó valores entre 1,2 y 1,9, confirmando que el secado ocurre principalmente en la etapa de tasa

decreciente controlada por difusión interna. Entre los modelos evaluados, el de Midilli-Kucuk resultó ser el más adecuado para representar la cinética de secado, constituyendo una herramienta útil para la optimización del proceso y la valoración de este subproducto agroindustrial.

**Palabras claves:** *Hibiscus sabdariffa*, cálices agotados, cinética de secado, modelos empíricos

## ABSTRACT

**Modeling the drying of spent hibiscus flower calyxes (*hibiscus sabdariffa* L.): evaluation of empirical models at different temperatures.**

This study aimed to model the drying kinetics of spent calyxes of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) at 50, 60, and 70 °C, in order to select the empirical model that best describes moisture loss and to promote the use of this by-product as a functional ingredient rich in dietary fiber and phenolic compounds. Drying was carried out in a forced convection oven with constant air flow, using trays with a uniform material thickness of 3 mm. Four empirical model: Page, modified Page, Henderson-Pabis, and Midilli-Kucuk, were evaluated using nonlinear regression. Model parameters were calculated, and the goodness of fit was assessed using the adjusted coefficient of determination ( $R^2_{\text{adjusted}}$ ), root mean square error (RMSE), and reduced chi-square ( $\chi^2_{\text{red}}$ ). Results showed that the drying coefficient ( $k$ ) increased with temperature across all models, indicating thermal acceleration of the process. The exponent ( $n$ ) ranged from 1,2 to 1,9, confirm that drying occurred mainly during the falling rate period controlled by internal diffusion. Among the models evaluated, the Midilli-Kucuk model proved to be the most suitable for representing the drying kinetics, serving as a useful tool for process optimization and valorization of this agro-industrial by-product.

**Key words:** *Hibiscus sabdariffa*, spent calyxes, drying kinetics, empirical models

## INTRODUCCIÓN

Los cálices de la flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) son ampliamente utilizados en la industria alimentaria para la elaboración de infusiones, bebidas funcionales, colorantes naturales y productos nutraceuticos, debido a su alto contenido de antocianinas, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos con reconocida actividad antioxidante y efectos beneficiosos para la salud (1). En diversas regiones tropicales y subtropicales, su cultivo y procesamiento representa una fuente relevante de ingresos para comunidades rurales y pequeñas agroindustrias, lo que impulsa el interés por estrategias de aprovechamiento integral de esta materia prima (2).

Durante la producción industrial de extractos y bebidas, el proceso de decocción acuosa de los cálices genera un residuo sólido que a menudo es descartado, pese a conserva una fracción considerable de fibra dietética insoluble y compuestos fenólicos residuales con potencial fuente de antioxidantes naturales (3,4). El manejo inadecuado de este residuo representa un problema ambiental y una pérdida de recursos valiosos, lo que motiva su revalorización mediante procesos eficientes como el secado. Este proceso permite reducir la humedad y prolongar su vida útil, facilitando su almacenamiento y transformación posterior.

En este contexto, el modelado matemático del secado es fundamental para evaluar, parametrizar y optimizar el proceso. Por ello, los modelos validados deben ser capaces de describir, cuantificar y predecir el comportamiento del secado de manera precisa. El propósito de esta investigación fue modelar la cinética de secado de los cálices agotados de flor de Jamaica a tres temperaturas aplicando los modelos empíricos de Page, Page modificado, Henderson-Pabis y Midilli-Kucuk y seleccionar el que mejor describa el proceso y contribuir al desarrollo de alternativas sostenibles de valorización agroindustrial.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon los cálices agotados de flor de Jamaica, subproducto de la decocción luego de obtener el extracto acuoso de acuerdo con el proceso establecido en la Planta Piloto de Vegetales, del Centro de investigaciones para la Industria Alimentaria (CIIA), con un contenido de humedad inicial de aproximadamente 70 %.

- Condiciones de secado: los experimentos se realizaron a escala de laboratorio en una estufa de 55 L de capacidad con circulación de aire forzada marca Venticell (MMM Medcenter Einrichtungen GmbH), operada con un flujo de aire constante de 55 m<sup>3</sup>/min. El material se dispuso en bandejas en una sola capa, con un espesor uniforme de 3 mm. Se evaluaron tres temperaturas de secado: 50, 60 y 70 °C. Las muestras se retiraron a intervalos regulares de tiempo y se determinó el contenido de humedad en analizador de humedad Kern modelo DBS 60-3 (Kern & Sohn GmbH) a 105 °C hasta alcanzar una diferencia de peso ≤ 0,1 %. La humedad de equilibrio ( $M_e$ ) se determinó experimentalmente para cada temperatura obteniéndose valores de 6,25 % (50 °C), 3,4 % (60 °C) y 2,4 % (70 °C) en base fresca.
- Modelos empíricos evaluados: la cinética de secado (humedad vs. tiempo) fue analizada mediante el ajuste de los siguientes modelos empíricos de secado:
  - Page:  $MR = \exp(-k \cdot t^n)$
  - Page modificado:  $MR = a \cdot \exp(-(k_{mod} \cdot t)^n)$
  - Henderson y Pabis:  $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
  - Midilli-Kucuk:  $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

donde:  $MR$  es la razón de humedad y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

$M_t$ : humedad en el tiempo  $t$  base seca;  $M_e$ : humedad de equilibrio base seca;  $M_o$ : humedad inicial base seca;  $t$  tiempo (minutos);  $k$  y  $k_{mod}$  las constantes de secado ( $\text{min}^{-n}$ );  $n$  el exponente adimensional;  $a$  un factor de ajuste cercano a la unidad y  $b$  el coeficiente lineal (modelo Midilli-Kucuk).

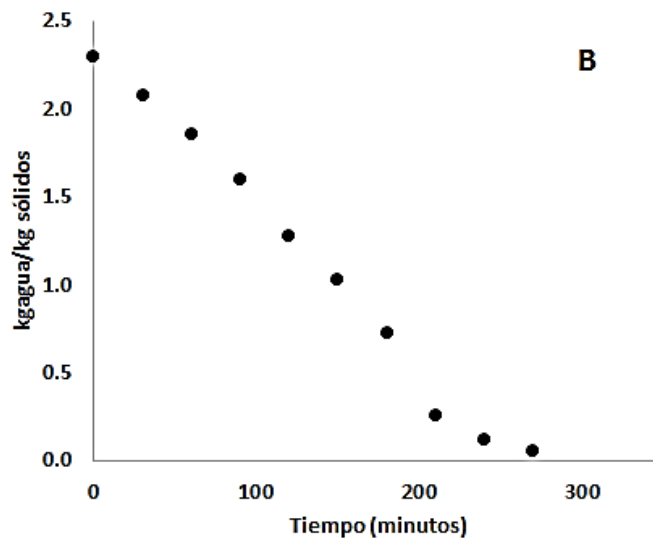
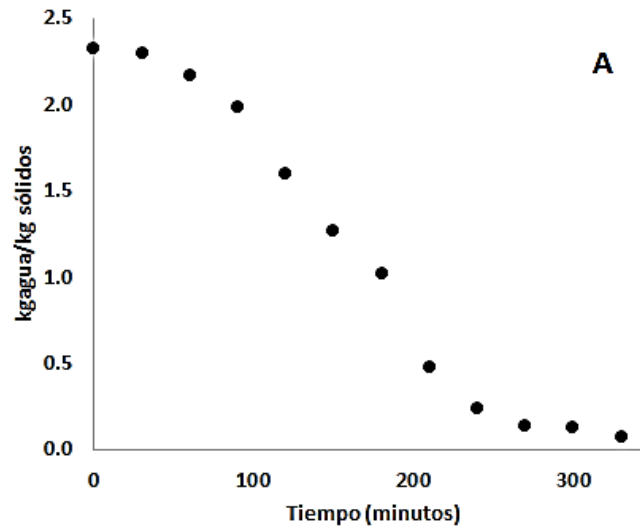
- Evaluación del ajuste: la calidad del ajuste se evaluó con los siguientes indicadores estadísticos:
    - Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{ajustado}$ ):  
$$R^2 = 1 - \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}\right) \times \frac{n-1}{n-z-1}$$
    - Error cuadrático medio ( $ECM$ ):  $ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$
    - Chi – cuadrado reducido ( $\chi^2_{reducido}$ ):  $\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - z}$
- dónde:  $y_i$  valor real de la variable dependiente;  $\bar{y}$  valor medio de la variable dependiente;  $\hat{y}_i$  valor predicho por el modelo;  $n$  número de observaciones;  $z$  número de parámetros del modelo.
- Análisis estadístico: la determinación de los parámetros de los modelos empíricos se realizó mediante regresión no lineal, utilizando el algoritmo de optimización iterativa de Levenberg-Marquardt. Las incertidumbres estándar asociadas a los parámetros se calcularon a partir de la matriz de covarianza. La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación ( $R^2_{ajustado}$ ), el error cuadrático medio ( $ECM$ ) y la prueba de chi-cuadrado reducido ( $\chi^2_{red}$ ). El análisis se realizó con el programa estadístico IBM SPSS Statistics, versión 22.

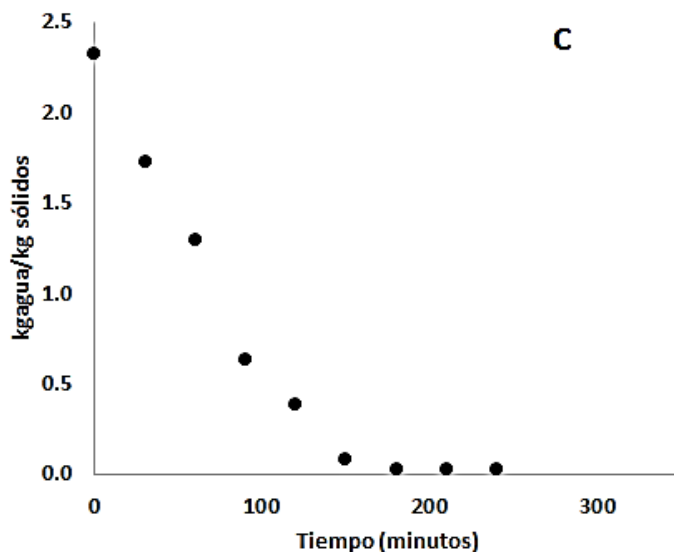
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evolución de la pérdida de humedad durante el secado de los cálices agotados de flor de Jamaica mostró un comportamiento exponencial decreciente, aproximándose de manera asintótica a la humedad de equilibrio (Figura 1). La ausencia de una fase de velocidad constante confirma que el

proceso ocurre predominantemente en la etapa de velocidad decreciente, donde la difusión interna de la humedad constituye el mecanismo limitante de la transferencia de masa. Este es típico en materiales con alta resistencia estructural,

como los ricos en celulosa, hemicelulosa y pectinas, en los que la migración del agua ligada hacia la superficie determina de la cinética de secado (5).





**Fig. 1. Comportamiento de la humedad en el tiempo durante el secado a las temperaturas de 50 (A), 60 (B) y 70 (C) °C.**

La temperatura influyó notablemente en la velocidad de secado, observándose una mayor pérdida de humedad a medida que aumentaba la temperatura. Esto se reflejó en pendientes más pronunciadas y una reducción del tiempo necesario para alcanzar la humedad de equilibrio, atribuido al aumento de la presión de vapor interna, que favorece la difusión y evaporación del agua (6,7). La forma de las curvas justifica la aplicación de modelos empíricos cuasi-exponenciales ampliamente utilizados en el secado de productos agrícolas (8,9).

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros obtenidos para los modelos empíricos ajustados. Se observa que el coeficiente de secado ( $k$ ) aumentó con la temperatura en los modelos de Page, Page modificado y Henderson-Pabis, lo que indica una mayor velocidad de eliminación de humedad debido a la mayor energía térmica disponible.

Este comportamiento es coherente con lo reportado en otros materiales vegetales como hojas de menta (6), rodajas de mango (7) y cálices de flor de Jamaica (10). En el caso del modelo de Midilli-Kucuk, los valores de  $k$  no mostraron una

tendencia estrictamente monótona, posiblemente debido a la correlación entre los parámetros  $k$  y  $n$  que ajustan simultáneamente la fase inicial y final del proceso.

El parámetro de forma ( $n$ ) mostró valores entre 1,2 y 1,9, lo que confirma que el secado ocurre principalmente en la etapa de velocidad decreciente, en la cual la difusión interna controla la salida de humedad. A medida que la temperatura aumentó, los valores de  $n$  tendieron a disminuir en los modelos de Page y Page modificado indicando una reducción de la curvatura de la curva de secado y un proceso más rápido, menos controlado por la difusión interna (8,11).

Los valores del parámetro  $a$  se mantuvieron próximos a la unidad, lo que confirma un ajuste coherente con la condición inicial  $MR_0 = 1$ . Por su parte, el término lineal  $b$  en modelo de Midilli-Kucuk, fue positivo y de baja magnitud, disminuyendo con el incremento de la temperatura, lo que apunta que su contribución es más apreciable a temperaturas de secado más bajas, asociada a la fase final del proceso, donde predominan mecanismos de transporte interno y adsorción superficial (8).

**Tabla 1. Parámetros de los modelos aplicados al secado de los cálices agotados de flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) a 50, 60 y 70 °C**

Temperatura	Modelo	a	k· (min <sup>-n</sup> )	n	b (min <sup>-1</sup> )
50 °C	Page	NA <sup>a</sup>	0,00012 (0,00002) <sup>b</sup>	1,92 (0,05)	NA
	Page modificado	NA	0,00512 (0,00020)	1,90 (0,06)	NA
	Henderson-Pabis	1,024 (0,013)	0,00847 (0,0003)	NA	NA
	Midilli-Kucuk	1,005 (0,006)	0,00218 (0,00014)	1,28 (0,02)	0,00008 (0,00001)
60 °C	Page	NA	0,00035 (0,00003)	1,78 (0,04)	NA
	Page modificado	NA	0,01049 (0,00032)	1,58 (0,04)	NA
	Henderson-Pabis	1,043 (0,015)	0,00984 (0,00029)	NA	NA
	Midilli-Kucuk	1,011 (0,006)	0,00154 (0,00008)	1,21 (0,02)	0,00006 (0,00001)
70 °C	Page	NA	0,00121 (0,00011)	1,65 (0,03)	NA
	Page modificado	NA	0,02350 (0,00052)	1,32 (0,03)	NA
	Henderson-Pabis	1,085 (0,021)	0,02145 (0,00058)	NA	NA
	Midilli-Kucuk	1,0291 (0,0042)	0,00027 (0,00006)	1,89 (0,02)	0,000002 (0,000001)

<sup>a</sup> NA significa: No aplica; <sup>b</sup> incertidumbre estándar

Según los indicadores estadísticos informados en la Tabla 2, el modelo de Midilli-Kucuk obtuvo consistentemente los mejores índices de ajuste a las tres temperaturas estudiadas (50, 60 y 70 °C). En particular, alcanzó los mayores valores de  $R^2_{ajustado}$  (0,996 – 0,997) y los menores valores de *chi-cuadrado* reducido (0,0002 – 0,0006). Aunque otros modelos

como el de Page también presentaron  $R^2_{ajustado}$  altos, la evaluación integral de los indicadores favorece al modelo de Midilli-Kucuk como la mejor opción. Su consistencia ha sido comprobada en diversos productos vegetales (8, 12,13). No obstante, al tratarse de un modelo empírico, se recomienda precaución al extrapolar fuera del rango experimental y validar con datos adicionales (11,14).

**Tabla 2. Indicadores estadísticos de calidad de ajuste para los modelos empíricos**

Temperatura	Modelo	R <sup>2</sup> ajustado	ECM <sup>a</sup>	χ <sup>2</sup> reducido
50 °C	Page	0,992	0,0181	0,0151
	Page modificado	0,994	0,0369	0,0094
	Henderson-Pabis	0,968	0,0534	0,0036
	Midilli-Kucuk	0,996	0,0350	0,0002
60 °C	Page	0,996	0,0124	0,0085
	Page modificado	0,985	0,0448	0,0018
	Henderson-Pabis	0,984	0,0431	0,0018
	Midilli-Kucuk	0,997	0,0171	0,0005
70 °C	Page	0,995	0,0063	0,0794
	Page modificado	0,996	0,0072	0,0650
	Henderson-Pabis	0,994	0,0293	0,0009
	Midilli-Kucuk	0,997	0,0092	0,0006

<sup>a</sup> Error cuadrático medio

## CONCLUSIONES

El secado de los cálices agotados de flor de Jamaica se describe adecuadamente mediante modelos empíricos exponenciales. Entre los modelos evaluados, el de Midilli-Kucuk presentó el mejor ajuste en todo el rango de temperaturas estudiadas, al reproducir con precisión tanto la fase inicial como la etapa final del proceso. En consecuencia, este modelo se propone como la herramienta más adecuada para predecir y optimizar el secado de este residuo contribuyendo a su valorización como ingrediente funcional en la industria alimentaria.

Esta investigación es un resultado del proyecto: Aprovechamiento de los cálices agotados de flor de Jamaica en la elaboración de subproductos ricos en fibra antioxidante, perteneciente al programa sectorial de Industrialización de Alimentos financiado por el Centro de Investigaciones para la Industria Alimenticia (CIIA) de Cuba.

## REFERENCIAS

- Da Costa-Rocha I, Bonnlaender B, Sievers H, Pischel I, Heinrich M. *Hibiscus sabdariffa* L. – A phytochemical and pharmacological review. Food Chem 2014; 165:424-43.
- Ramírez-Rodríguez MM, Plaza ML, Azevedo AM, Balaban MO, Marshall MR. Physicochemical and phytochemical properties of cold and hot water extraction from *Hibiscus sabdariffa*. J Food Sci 2011; 76:428-35.
- Borrás-Linares I, Fernández-Arroyo S, Arráez-Román D, Palmero-Suárez PA, Del Val-Díaz R, Andrade-González I, Gómez-Leyva JF, Segura-Carretero A. Characterization of phenolic compounds, anthocyanidin, antioxidant and antimicrobial activity of 25 varieties of Mexican *Hibiscus sabdariffa*. Ind Crop Prod 2015; 69:385-94.
- Mohammed M, Al-Ayed AS, Al-Omar MS, Alhowail AH. Phenolic compounds and antioxidant activity of *Hibiscus sabdariffa* L. calyces after brewing and residues utilization. Food Chem 2020; 333: 127-35.
- Krokida MK, Maroulis ZB. Quality changes during drying of food materials. Dry Technol 2000; 18:2009-2054.
- Doymaz I. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). Energy Convers Manag 2012; 56:199-205.

7. Vega-Gálvez A, Fito P, Andrés A, Lemus R. Mathematical modelling of hot-drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *J Food Eng* 2006; 79:1460-66.
8. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single-layer drying. *Dry Technol* 2002; 20:1503-13.
9. Erbay Z, Icier F. A review of thin layer drying of foods: theory, modelling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2010; 50:441-64.
10. Kingsly RP, Singh DB, Manikantan MR, Jain RK. Moisture dependent physical properties of dried pomegranate seeds (*Anardana*). *J of Food Eng* 2007; 75:492-96.
11. Ertekin C, Zaya Firat M. A Comprehensive Review of Thin Layer Drying Models Used in Agricultural Products. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2015; DOI: 10.1080/10408398.2014.910493.
12. Akpınar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Convers Manag* 2003; 44:1689–1705.
13. Sobukola OP, Dairo OU, Sanni LO, Odunewu AV, Fafiolu BO. Thin layer drying process of some leafy vegetables under open sun. *Food Sci Technol Int* 2007; 13:35–40.
14. Thirumalai Natesan V, Mani P, Siva Prasad TJ, Mohan Krishna J, Sekar S. Applications of thin layer modelling techniques and advances in drying of agricultural products. *AIP Conference Proceedings* 2020; DOI: 10.1063/5.0033995