

## Determinación de parámetros característicos del proceso de secado en Mango y Zanahoria aplicando modelos cinéticos

CANDELARIO, Juan\*†, LUNA, Guadalupe, URREA, Galo, RAMÍREZ, Alejandra

Recibido 02 Octubre, 2017; Aceptado 29 Noviembre, 2017

### Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar el mejor modelo cinético que se ajuste al proceso de secado de hojuelas de mango y zanahoria. Seis modelos (Newton, Page, Dos términos exponenciales, Wang y Singh, difusión aproximada, Henderson y Pabis) fueron aplicados para evaluar la cinética de secado. La difusión efectiva se determinó empleando la segunda ley de Fick. Los resultados experimentales del proceso de secado fueron empleados para determinar los parámetros característicos de las cinéticas. La difusividad experimental efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ) fue  $1.05914 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  y  $1.23746 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  para el mango y zanahoria, respectivamente. Para el mango, los modelos de Newton y Page mostraron un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.9763 y 0.9854, respectivamente. Además, la  $D_{\text{eff}}$  obtenida por estos modelos fueron  $6.91683 \times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  y  $1.23746 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . El  $R^2$  en zanahoria fue 0.994 y 0.9955, de acuerdo a los mejores modelos cinéticos (Newton y Page) respectivamente. La  $D_{\text{eff}}$  de la zanahoria fue  $8.72709 \times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  y  $6.86279 \times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  con respecto a los modelos de Newton y Page. Por lo que, este estudio sugiere que los modelos de regresión con el mayor ajuste a los datos experimentales fueron los modelos de Newton y Page, obteniendo elevados coeficientes de correlación para el mango y zanahoria.

### Mango y zanahoria, modelos cinéticos, difusividad efectiva

### Abstract

The aim of this study was to determine the best kinetic model of drying mango and carrot slices. Six models (Newton, Page, Two exponential terms, Wang and Singh, approximate diffusion, Henderson and Pabis) were applied to evaluate the drying kinetics. Fick's second law was used to determine the effective diffusion. The experimental results of drying process were employed to determine the characteristics parameters of the kinetics. Obtaining an effective diffusivity ( $D_{\text{eff}}$ )  $1.05914 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  and  $1.23746 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  for mango and carrot, respectively. For the mango, the Newton and Page models showed a higher correlation coefficient ( $R^2$ ) of 0.9763 and 0.9854, respectively. In addition, the effective diffusivity ( $D_{\text{eff}}$ ) obtained by these models were  $6.91683 \times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  and  $1.23746 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . The carrot correlation coefficient ( $R^2$ ) was 0.994 and 0.9955, according to the best models (Newton and Page) respectively. The carrot  $D_{\text{eff}}$  was  $8.72709 \times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  and  $6.86279 \times 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  according to the Newton and Page kinetics models. So, this study suggests that the regression models with a better fit to experimental data were the Newton and Page models, obtaining a higher correlation coefficient for mango and carrot.

### Mango and carrot, kinetics models, effective diffusivity

**Citación:** CANDELARIO, Juan, LUNA, Guadalupe, URREA, Galo, RAMÍREZ, Alejandra. Determinación de parámetros característicos del proceso de secado en Mango y Zanahoria aplicando modelos cinéticos. Revista de Simulación y Laboratorio 2017, 4-13: 28-32

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ariza.rafael@inifap.gob.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

Los alimentos más cultivados y consumidos alrededor del mundo son el mango y la zanahoria, debido a su gran aporte nutricional (Villegas *et al.*, 2011; Munawar *et al.*, 2016). Sin embargo, poseen un gran contenido de agua, lo que conlleva a ser propensos a reacciones de descomposición, repercutiendo en la calidad y en la vida de anaquel (Chen *et al.*, 2016). Diversos productos han sido elaborados a partir de ellos, permitiendo incrementar su valor en el Mercado. Los productos elaborados a partir de ellos pueden presentarse en dos formas: fresca y deshidratado (Villegas *et al.*, 2011; Megías *et al.*, 2014; Munawar *et al.*, 2016). Los alimentos deshidratados permiten un transporte y almacenamiento más fácil en comparación con los productos frescos. De esta manera, la forma más popular de conservación de los alimentos es mediante la aplicación de métodos de secado (Chen *et al.*, 2016).

El secado que se utiliza con mayor frecuencia en la conservación de los alimentos es mediante la aplicación de aire caliente. Este proceso de secado reduce considerablemente el contenido de agua y la actividad microbiológica del material. Minimizando los cambios físicos y químicos durante su almacenamiento (Chen *et al.*, 2015; Galaz *et al.*, 2017).

De acuerdo con diversos estudios (Lee *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2015; Galaz *et al.*, 2017) encontrar un modelo matemático que gobierne cada paso de la evolución del proceso de secado es difícil (Mghazli *et al.*, 2017).

Los modelos matemáticos teóricos detallan los mecanismos de transferencia, pero su uso es limitado debido a la dificultad de obtener ciertos parámetros que permitan describir el comportamiento de la pérdida de humedad.

Los modelos empíricos y semi-empíricos no se distinguen todos los mecanismos de transferencia de agua. Debido a esto, los modelos empíricos y semi-empíricos son usados para la descripción del comportamiento del agua en la matriz del alimento y de esta manera permite conocer indirectamente la difusividad del agua (Carlescu *et al.*, 2017; Mghazli *et al.*, 2017). Las cinéticas de secado han sido analizadas para la obtención de valores de difusión efectiva en algunos alimentos (Carlescu *et al.*, 2017). La difusión efectiva de la humedad es una propiedad importante de transferencia en alimentos y otros materiales para modelar los procesos de secado (Mghazli *et al.*, 2017).

## Metodología

### Materiales

Las muestras de mango Manila y zanahoria fueron adquiridas en un Mercado local de Orizaba, Veracruz, México. El mango Manila presentó un contenido de humedad de 69.89 % y fue seleccionado de acuerdo al grado de madurez. La fruta mostró un color más verde que Amarillo. Con relación a la zanahoria, el contenido de humedad fue de 85.91 %. Las muestras de zanahoria presentaron un color uniforme y no presentaron protuberancias o daños.

### Acondicionamiento de la muestra

Ambas muestras fueron lavadas y el exceso de agua fue eliminado mediante papel absorbente. El mango fue pelado y cortado en hojuelas de 2 cm de diámetro y 0.2 cm de espesor usando un cortador diseñado para este propósito.

Con respecto a la zanahoria se obtuvieron hojuelas con las mismas dimensiones sin eliminar la piel del tubérculo. Las hojuelas fueron colocadas en mallas y posteriormente fueron introducidas a un secador a 60 °C.

### Evaluación de la pérdida de humedad

La pérdida de humedad fue monitoreada en diferentes tiempos (0, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240 y 300 minutos). El proceso de secado fue llevado a cabo en un secador vertical de charolas escala piloto marca PISA. El cual cuenta con un sistema de control de temperatura. El equipo recircula aire a una velocidad de 1 m s<sup>-1</sup>. Además, se encuentra equipado con un sistema de calefacción en la parte superior del equipo. Los parámetros evaluados durante el proceso de secado de mango y zanahoria fueron el contenido de humedad y actividad de agua. El contenido de humedad fue determinado mediante una Termobalanza de Halógeno marca OHAUS modelo MB35. La actividad de agua (a<sub>w</sub>) fue determinada a 25 °C mediante un medidor de actividad de agua modelo series 3 T marca Aqualab. Fueron retiradas 2 hojuelas del secador para cada determinación y en cada uno de los tiempos en el proceso de secado.

### Determinación de los parámetros en las curvas de secado

Las características de las curvas de secado permiten el análisis detallado del proceso de secado en cada una de las muestras utilizadas. Para la determinación de los parámetros de las cinéticas de secado, fue necesario realizar la conversión de contenido de humedad (%X<sub>w.b.</sub>) en base húmeda a base seca (X<sub>d.b.</sub>) mediante la ecuación 1 y posteriormente obtener la proporción de secado (MR) mediante la ecuación 2.

$$X_{d.b.} = \frac{\left(\frac{\%X_{w.b.}}{100}\right)}{1 - \left(\frac{\%X_{w.b.}}{100}\right)} \quad (1)$$

$$MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

Donde  $M(t)$  es el contenido de humedad en el tiempo  $n$ ;  $M_e$  es el contenido de humedad en equilibrio y  $M_0$  es el contenido de humedad en el tiempo inicial.

### Ajuste de valores experimentales

Para describir el comportamiento de las cinéticas de secado fueron aplicados diversos modelos empíricos y semi-empíricos. Seis modelos empíricos y semi-empíricos fueron aplicados (Tabla 1). Con los cuales se ajustaron los valores experimentales de las curvas de secado mediante la utilización del software Matlab.

Modelo	Ecuación	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Salcedo <i>et al.</i> , 2016
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Mghazli <i>et al.</i> , 2017
Dos Términos Exp.	$MR = \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	Lee <i>et al.</i> , 2009
Wang y Shingh	$MR = 1 + at + bt^2$	Chen <i>et al.</i> , 2015
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Lee <i>et al.</i> , 2009
Henderson y Pabis	$MR = a * \exp(-kt)$	Montes <i>et al.</i> , 2008

**Tabla 1** Modelos matemáticos aplicados a las curvas de secado

En el que se realizaron regresiones no lineales obteniendo coeficientes de regresión (R<sup>2</sup>). El R<sup>2</sup> fue el principal criterio para la selección del mejor modelo que permite describir las curvas de secado.

Además, el RMSE (Raíz Cuadrada del Error Medio), SSE (Suma de Cuadrado del Error) y  $\chi^2$  (Chi-cuadrada) fueron usados para determinar el mejor ajuste de los modelos.

### Difusión efectiva

La segunda ley de Fick fue usada para describir la pérdida de agua durante el proceso de secado por chaloras de las hojuelas de mango y zanahoria. Debido que la humedad global de las hojuelas o del alimento puede ser representada en un modelo cinético de primer orden, se asume que la transferencia de masa solamente ocurre a una dirección y cuando el tiempo de secado es largo, la proporción de la pérdida de humedad se encuentra definida por la ecuación 3; la cual comúnmente es utilizada para el estudio de los productos agrícolas (Montes *et al.*, 2006).

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-D_{eff} * \pi^2 * t}{4L^2}\right)} \quad (3)$$

Donde  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusión efectiva del agua ( $m^2/s$ ),  $t$  es el tiempo de secado (s) y  $L$  es el espesor medio de la hojuela (m). La difusión efectiva fue determinada a partir de los valores experimentales del secado de mango Manila, zanahoria y de los modelos matemáticos utilizados en este proyecto.

### Resultados y discusión

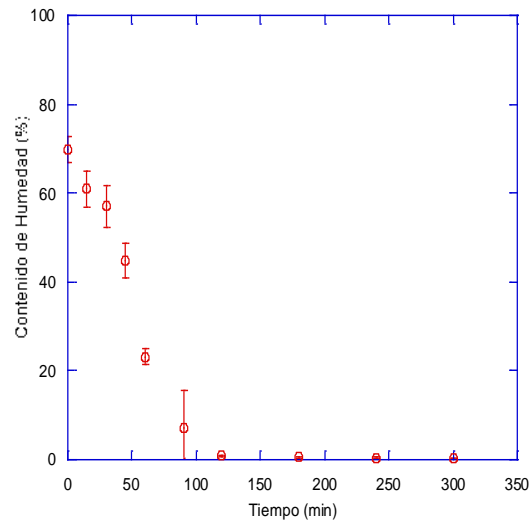
#### Curvas de secado experimentales

Las hojuelas de mango Manila y zanahoria fueron deshidratadas a 60 °C. El cambio de humedad versus tiempo de secado de ambas hojuelas se muestra en la Figura 1. Con lo que respecta, el contenido de humedad decrece continuamente con el tiempo, esto se debe al efecto de la temperatura y el cambio de fase de agua dentro de la matriz alimenticia.

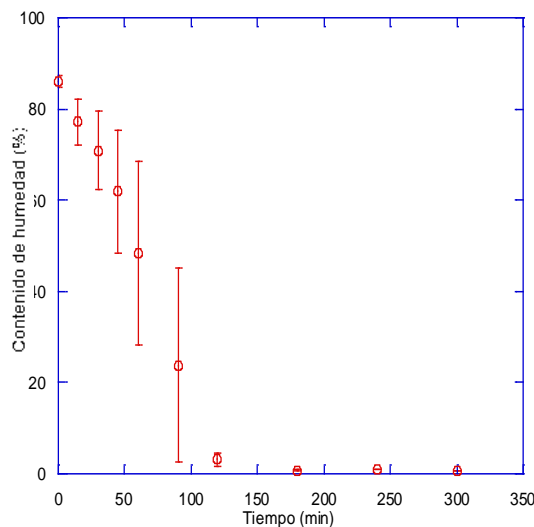
Resultados similares reportó Bautista *et al.*, (2016) y Pu *et al.*, (2017) con respecto al mango variedad “Tommy Atkins”. En adición, Prakash *et al.*, (2004) reportó para la zanahoria un tiempo de secado de 70 min, utilizando un secador de lecho fluidizado.

La actividad de agua durante el proceso de secado disminuyó considerablemente. En el tiempo inicial la  $a_w$  fue de 0.976 y 9.87 para el mango y zanahoria, respectivamente. Con respecto al final del proceso de secado, las hojuelas de mango Manila obtuvieron un valor de 0.356. mientras que la zanahoria presentó 0.343. valores similares reporta Dipersio *et al.*, (2007), para la zanahoria, sin embargo, su tiempo de secado fue de 4-6 horas.

Concordando con lo reportado por Martuscelli *et al.*, (2007), la  $a_w$  es una propiedad termodinámica extensamente utilizada como herramienta para el control de la calidad de los productos deshidratados. Además, las muestras que presentan un valor superior de actividad de agua ( $a_w=0.6$ ), manifiestan reacciones de descomposición debido al crecimiento de microorganismos; perjudicando la vida de almacenamiento (Domínguez-Niño *et al.*, 2016). Debido a esto, los alimentos comúnmente se adiciona agentes estabilizadores (conservadores) o en su caso, se debe eliminar la mayor parte de agua presente en la matriz alimenticia para obtener valores inferiores de 0.4 de actividad de agua y prolongar su vida de almacenamiento.



a)



b)

**Figura 1** Evolución de la pérdida de humedad en el proceso de secado en hojuelas de: a) mango y b) zanahoria

### Aplicación de los modelos matemáticos

Los valores experimentales obtenidos en el proceso de secado fueron convertidos a MR y ajustados mediante Matlab con los modelos mostrados en la Tabla 1.

### Referencias

Abou-Awad, B.A., B.M. El-Sawad, A.S. Reda, and A.A. Abdel-Khalek. 2000. Environmental management and biological aspects of two eriophyoid fig mites in Egypt: *Aceria ficus* and *Rhyncaphytoptus ficifoliae*. *Acarologia*, 40:419-429.

Ariza-Flores, R., Cruzaley Sarabia R, Vázquez-García, E., Pita Flores, L. 2003. Evaluación de los daños por el ácaro *Phyllocoptruta oleivora* (Ashmead) en la calidad de los frutos de limón Mexicano. En: *Entomología Mexicana* (2). México, D.F. Pág. 53-57.

Childers, C.C. 1986. Methods for the routine screening of acaricides against the citrus rust mite *Phyllocoptruta oleivora* (Ashmead) (Acari: Eriophyidae). *British Crop Protection Conference, Pest and Diseases*, 3:C-17.

López Arroyo, J.I., Loera Gallardo J., Miranda Salcedo M., Rocha Peña M. 2003. Manejo Integrado de plagas de los cítricos en México. Memoria del XVI Curso de Manejo y Producción de Frutales II. Coatepec de Harinas, Edo. Mex.

SIAP. 2014. Información de cítricos. Sistemas de información Agropecuaria. México, D.F. 132 p.

Van Leeuwen, T., J. Witters, R. Nauen, C. Duso, and L. Tirry. 2010. The control of eriophyoid mites: state of the art and future challenges. *Experimental and Applied Acarology*, 51:205-224.