

## Modelación de las cinéticas de deshidratación de nopal por secado infrarrojo

B. Hernández Díaz, J. A. Gómez Salazar y M. E. Sosa Morales

Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. [msosa@ugto.mx](mailto:msosa@ugto.mx)

**RESUMEN:** El nopal (*Opuntia ficus-indica*) se encuentra entre los alimentos de mayor consumo en México, además de ser una de las principales riquezas del país y de fácil adaptación. Sin embargo, por sus características fisiológicas, este alimento es considerado como perecedero y, por tanto, no aprovechado como se debe. La conservación de los alimentos es un punto clave para evitar el desaprovechamiento de algunos alimentos, ya que su acción principal es retardar el deterioro de estos mediante diferentes técnicas, principalmente llevadas a cabo por la aplicación de calor. La industria de alimentos busca obtener productos deshidratados, a fin de conseguir una mayor vida útil y disminuir pérdidas poscosecha. Sin embargo, la selección de un método de secado adecuado, la determinación de los parámetros óptimos de operación y el conocimiento de las propiedades físicas del alimento son esenciales para alcanzar una elevada calidad en productos. Por ello, se estudió el secado de cubos de nopal a partir de secado por radiación infrarroja. Se determinaron las cinéticas de deshidratación para describir el proceso y calcular los coeficientes de difusión. Los valores de los coeficientes de difusión variaron entre  $8.56 \times 10^{-10}$  y  $1.28 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, la energía de activación requerida para el proceso fue de 28.44 kJ/mol.

**Palabras clave:** Secador infrarrojo, nopal, coeficiente de difusión másica.

**ABSTRACT:** The nopal (*Opuntia ficus-indica*) is one of the most consumed foods in Mexico, besides being one of the main riches of the country and easy to adapt to different environments. However, due to its physiological characteristics, this food is considered perishable and, therefore, not exploited at all. The preservation of foods is a key point to avoid the waste of some foods, since its main action is to slow the deterioration of these through different techniques, mainly carried out by the application of heat. The food industry seeks to obtain dehydrated products of said product, in order to achieve a longer useful life and reduce their post-harvest losses. However, the selection of an adequate drying method, the determination of optimum operating parameters and the knowledge of the physical properties of the food are essential to achieve a high quality in products. For this reason, nopal cubes were dried by infrared radiation. The kinetics of dehydration were determined to describe the process and calculate the diffusion coefficients. The values of the diffusion coefficients varied between  $8.56 \times 10^{-10}$  and  $1.28 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, while the energy inactivation for the process was 28.44 kJ/mol.

**Keywords:** Infrared drying, nopal, mass diffusion coefficient.

**Área:** Frutas y hortalizas

### INTRODUCCIÓN

El nopal pertenece a la familia de las cactáceas del género *Opuntia*. Este género es endémico de América y actualmente se han reconocido 277 especies, 104 crecen en México en forma silvestre; 60 de las cuales son endémicas de nuestro país (Anaya-Pérez, 2001). A pesar de que México es el principal exportador de nopal, solamente el 1% de su producción se utiliza para este mercado; esto se debe a que el nopal es un producto perecedero, por la elevada actividad fisiológica que tiene después de ser cosechado, lo que disminuye su vida de anaquel y aumenta las pérdidas; además de que por sus características físicas, como el alto contenido de espinas y mucilago es muy difícil su manejo durante la comercialización (Rubio, 2010). El secado es la técnica comercial de deshidratación más comúnmente empleada en la industria de procesamiento de alimentos. En los últimos años se ha empleado de manera eficaz para incrementar la vida útil de varias frutas y hortalizas (Vásquez *et al.*, 2006) El secado por radiación infrarroja (IR) se ha investigado como un método potencial para la obtención de alimentos secos de alta calidad. La radiación infrarroja provoca una excitación en las moléculas de agua, provocando que estas colisionen y generen energía térmica a causa de la fricción

(Saavedra, 2011). La radiación IR tiene significativas ventajas con respecto al secado convencional como elevadas velocidades de secado, que proporcionan ahorros significativos de energía; se presentan elevados coeficientes de transferencia de calor; el tiempo de procesamiento es relativamente corto; el proceso se puede realizar a temperatura ambiente, y la distribución de temperaturas es uniforme (Paulino *et al.*, 2016). Sin embargo, la exposición de alimentos a energía térmica puede afectar las propiedades de estos, tales como la composición química, textura, color y sabor (Walti-Chanes *et al.*, 2005). Por lo tanto, la selección de un método de secado adecuado y la determinación de los parámetros óptimos de operación, son esenciales para lograr alcanzar una elevada calidad en productos además de un mínimo costo y rendimientos máximos (Clemente *et al.*, 2011, Sharma *et al.*, 2009). El objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética de secado del nopal, obteniendo también el coeficiente de difusión efectivo del agua cuando se somete a la deshidratación por radiación infrarroja.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materia prima

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) se adquirió en la central de abastos de la ciudad de Irapuato Gto. Los nopales son del mismo lote y se seleccionaron visualmente, por su apariencia sana y tamaño similar. Las pencas se lavaron previamente y se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio al 1% en un periodo de 5 min, posteriormente se enjuagaron en agua limpia y la humedad superficial se removió con papel absorbente.

### Deshidratación por infrarrojo

Se usó un equipo (Figura 1) construido en la Universidad de Guanajuato, este equipo incluye lámpara de 250 W con un ventilador (velocidad de 2 m/s), balanza digital y reóstato. Se introdujo un lote de cubos de nopal (80g) con una dimensión de 6.5 mm de espesor en el área de mayor incidencia infrarroja (elipse). Se determinaron las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco y se registró la pérdida de peso para posteriormente construir las curvas de secado. La lámpara se colocó a una distancia de 16 cm de la muestra, volteándose cada 15 min, con un tiempo total de secado de 90 min, las cinéticas de secado fueron realizadas por duplicado.



*Figura 1. Equipo de radiación infrarroja*

### Contenido de Humedad

Se pesaron 5 g de muestra en un crisol a peso constante y se sometieron a secado en una estufa con ventilación a 115°C, el porcentaje de humedad es obtenido por:

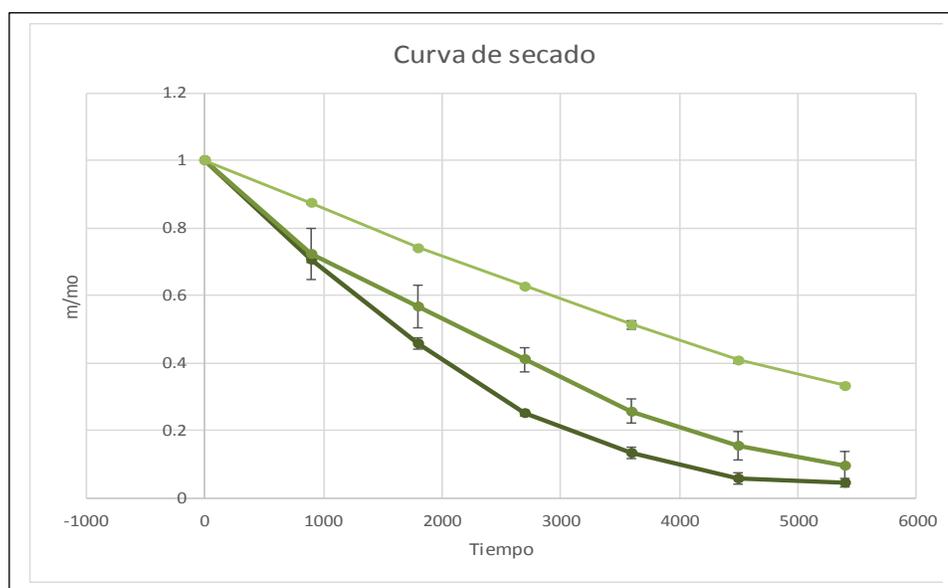
$$\%Humedad = \left( \frac{m - a}{m} \right) * 100$$

m= Es la masa muestra húmeda (g)

a= Es la masa muestra seca (g)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se presentan las cinéticas de secado de los cubos de nopal con las tres condiciones de secado, los valores de **M** (humedad en términos adimensionales) fueron graficados en función del tiempo. Los valores adimensionales fueron obtenidos a partir de los pesos registrados. Los resultados muestran que la humedad de la muestra fue decreciendo continuamente con el tiempo de secado, resultando el secado a 80°C (100% de la potencia de la lámpara IR) con mayor pérdida de humedad y menor tiempo de proceso. Por el contrario, en la cinética de la temperatura a 50°C (60% de potencia de la lámpara IR) se pueden observar valores más altos de contenido de humedad al final de la cinética.



**Figura 2.** Cinética de secado de cubos de nopal sometidos a radiación infrarroja a diferentes potencias (temperaturas).

El coeficiente de difusión se calculó a partir de la ecuación de la segunda ley de difusión de Fick. La difusividad del agua se puede determinar a partir de la pendiente de la gráfica en función del tiempo, resultando la siguiente ecuación:

$$Deff = \frac{Pendiente * 4 * L^2}{\pi^2}$$

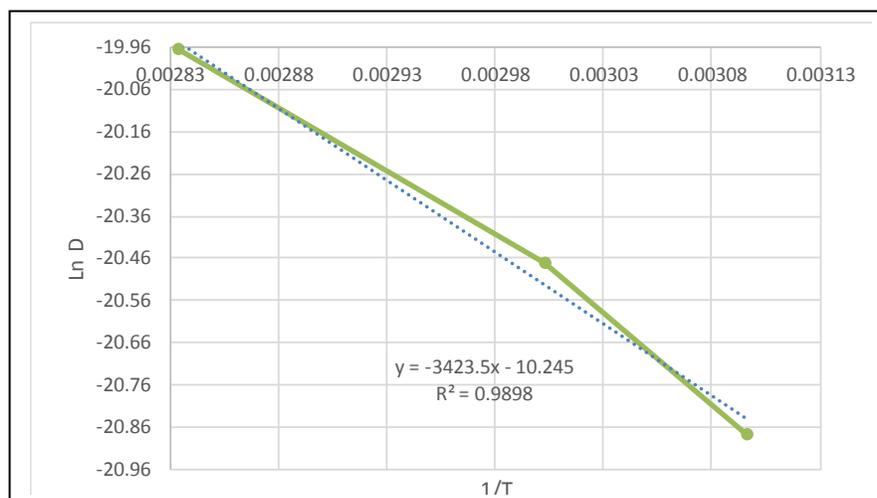
Los valores del coeficiente de difusión del agua para la cinética de secado de los cubos de nopal a 80, 60 y 50°C se muestran en la Tabla 1. Los coeficientes de difusión de 80 y 60°C fueron similares, mientras que el valor más bajo de coeficiente de difusión se presentó para el tratamiento con la temperatura de 50°C. Por lo tanto, se puede concluir, que el aumento de la temperatura de secado incrementa el coeficiente de difusión del agua.

<b>Tabla I.</b> Coeficiente de difusión de agua en cubos de nopal secados por radiación infrarroja		
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>(R<sup>2</sup>)</b>
<b>80</b>	2.1404x10 <sup>-9</sup>	0.9858
<b>60</b>	1.2842x10 <sup>-9</sup>	0.9915
<b>50</b>	8.5616x10 <sup>-10</sup>	0.9928

Los resultados obtenidos en este proyecto fueron cercanos a los reportados por Sadin et al. (2014) para pencas de nopal deshidratadas, los cuales fueron de 2.978 x 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s para la temperatura de 60°C y de 7.6 x 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s secados a 50°C. Las variaciones presentadas pueden atribuirse principalmente a las dimensiones en las que se deshidrató el nopal.

La energía de activación (Ea) es la energía necesaria para comenzar con la difusividad del agua del producto. Se determinó la energía de activación a través de los coeficientes de difusión obtenidos en las tres condiciones de secado. En la Figura 3 se representan gráficamente, los valores de logaritmo natural

de dichos coeficientes frente al inverso de la temperatura absoluta (K), para posteriormente, mediante la ecuación de Arrhenius modificada, calcular la energía.



**Figura 3.** Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión. Cálculo de la energía de activación para el secado por infrarrojo de cubos de nopal.

De la ecuación de Arrhenius (Perea *et al.*, 2012) se tiene que:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{Rt}\right)$$

Donde  $E_a$  es la energía de activación;  $R$  es la constante de los gases (8.31 J/mol) y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

La energía de activación requerida fue de 28.44 kJ/mol, la cual fue menor que la reportada por Sadin *et al.* (2014), en donde la energía de activación registrada en pencas de nopal de 7 mm de espesor fue de 30.31 kJ/mol. Por otro lado, en el estudio realizado por Touil *et al.*, (2014) se reportó una energía de activación fue de 45.39 kJ/mol.

## BIBLIOGRAFÍA

- Paulino G.G.G., Abraham J.M.R., Sosa M.M.E., Martínez J.O.A., y Olalde P.V. 2016. Deshidratación de hojuelas de fresa asistida por infrarrojo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 1(2), 290-294
- Patlán G.S.J. 2018. Extracción asistida de los biocomponentes de cascara de tuna roja *Opuntia streptacantha* y su encapsulación. (Tesis de Maestría) Universidad de Guanajuato, Irapuato, Gto.
- Rubio P.V. 2010. Elaboración de productos deshidratados de nopal verdura. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), A. C., Unidad Culiacán.
- Clemente G, Bon J, Sanjuán N y Mulet A. 2011. Modelado en seco de carne de cerdo descongelada en condiciones de convección forzada. *Ciencia de la Carne* 88: 374–378.
- Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F., y Bermúdez-Aguirre, D. 2005. Phenomena of transport in food engineering. *Food Engineering Magazine* 67:113-128.

- Touil, A., Chemkhi, S., Zagrouba, F. 2014. Moisture Diffusivity and Shrinkage of Fruit and Cladode of *Opuntia ficus-indica* during Infrared Drying. *Journal of Food Processing*, 1-9.
- Sadin, R., Chegini, G., Sadin, H. 2014. The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. *Heat Mass Transfer* 50: 501–507.
- Saavedra E.J.L (2011): Aplicación de un proceso de secado asistido infrarrojo para la deshidratación del fruto de murtilla (*Ugni molinae turcz.*). (Tesis de pregrado) Universidad de Chile, Santiago, Chile.